

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIEROS MECÁNICOS

TEMA:
DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO
A TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.

AUTORES:
MIGUEL ANGEL GUALOTO GUACOLLANTE
JONATHAN FABRICIO PANCHI CONCHA


TUTOR:
NANCY VERONICA MORENO DIAGO

Quito, agosto del 2019


CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Miguel Angel Gualoto Guacollante con C.I. 172075195-5 y Jonathan Fabricio Panchi Concha con C.I. 172300573-0, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud que somos autores del trabajo de titulación: “DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.”, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana., quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Miguel Angel Gualoto Guacollante
C.I.: 172075195-5



.....
Jonathan Fabricio Panchi Concha
C.I.:172300573-0

Quito, agosto del 2019

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto Técnico, “DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.”, realizado por Miguel Angel Gualoto Guacollante y Jonathan Fabricio Panchi Concha obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo de final de titulación.

Quito, agosto del 2019



.....
Nancy Veronica Moreno Diago

CI: 175835530-7

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedicamos a nuestros padres que nos han apoyado incondicionalmente a lo largo de nuestra carrera, en especial por ese aliento y motivación para seguir adelante y así poder alcanzar nuestras metas profesionales y personales.

A nuestros hermanos que han sido nuestros compañeros de vida y de igual forma nos han apoyado en cada instante.

A Dios por permitirnos contar con salud y fuerzas para afrontar varios problemas que se nos han presentado, pero con su bendición hemos podido continuar siempre adelante y poder contar antes que cualquier título académico, el de ser buenas personas.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, es importante agradecer a la Universidad politécnica salesiana que nos acogió en sus aulas e instalaciones en general, como son sus laboratorios que fueron de gran ayuda para continuar con este trabajo.

En segundo lugar, queremos hacer un agradecimiento a cada uno del personal docente que nos formó y nos brindó de su conocimiento para poder avanzar profesionalmente, conocimiento con el cual contamos y fue importante para el desarrollo de este trabajo.

De manera especial agradecer a nuestra tutora de Tesis, la Ingeniera Nancy Moreno por la paciencia que han tenido y la ayuda que nos ha dado en este tiempo, en que se desarrolló este trabajo de titulación.

Finalmente queremos hacer llegar un reconocimiento y agradecimiento al personal administrativo en general que formó parte en actividades extraacadémicas pero que nos involucran con la institución.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	I
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	14
CAPÍTULO 1	15
MARCO TEORICO.....	15
1.1. Aceros.....	15
1.1.1. Aceros al Carbono.....	15
1.1.2. Clasificación de los aceros según su contenido de Carbono.....	16
1.1.3. Aceros Aleados	18
1.2. Propiedades mecánicas.....	19
1.2.1. Ensayo espectrofotométrico	20
1.2.2. Ensayos de dureza.....	20
1.2.3. Ensayo metalográfico.....	22
1.3. Aceros para endurecimiento superficial	26
1.3.1. Aceros para cementación	26
1.3.2. Aceros para Nitruración.	28
1.3.3. Acero AISI 5115	29
1.3.4. Aplicación industrial del material AISI 5115	29
CAPÍTULO 2.....	31
METODOLOGÍA	31
2.1. Difusión en sólidos.....	31
2.2. Tratamientos térmicos	31
2.3. Variables de los tratamientos térmicos.....	34
2.4. Etapas de los tratamientos térmicos	34

2.5.	Tipos de Tratamientos Térmicos	36
2.5.1.	Temple	36
2.5.2.	Revenido	37
2.5.3.	Normalizado	38
2.5.4.	Recocido.....	38
2.6.	Tratamientos térmicos superficiales	38
2.6.1.	Cementación.....	39
2.6.2.	Nitruración	42
2.7.	Hornos	44
2.7.1.	Tipos de horno	44
2.7.2.	Hornos según el sistema de calentamiento.....	45
2.7.3.	Hornos según la atmósfera	45
CAPÍTULO 3		47
DESAROLLO EXPERIMENTAL		47
3.1.	Validación del material.....	47
3.1.1.	Ensayo espectrofotométrico	47
3.1.2.	Ensayo de dureza Rockwell	48
3.1.3.	Ensayo de dureza Vickers	49
3.1.4.	Ensayo de metalografía	50
3.2.	Diseño y fabricación de la probeta	51
3.2.1.	Dimensión de la probeta	51
3.2.2.	Especificaciones de la probeta	53
3.2.3.	Preparación de la probeta	53
3.3.	Características de los tratamientos térmicos para endurecimiento superficial.	54
3.3.1.	Procedimiento de cementado	54
3.3.2.	Diseño del tratamiento térmico superficial de nitrurado.....	59
CAPÍTULO 4		61

ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
4.1. Identificación del Material	61
4.1.1. Ensayo de Espectrometría	61
4.1.2. Ensayo de dureza Rockwell	62
4.2. Análisis para probetas cementadas	63
4.2.1. Análisis de dureza para probetas del material AISI 5115 cementadas	63
4.2.2. Ensayo metalográfico de probetas cementadas.....	65
4.3. Análisis para probetas nitruradas.....	67
4.3.1. Análisis de dureza para probetas del material AISI 5115 nitruradas ...	67
4.3.2. Ensayo metalográfico de probetas nitruradas	70
4.4. Análisis comparativo de dureza.....	73
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros	16
Figura 2. Diagrama del principio de Rockwell según la norma NTE INEN-ISO 6508-1	21
Figura 3. Estructura granular de la Ferrita a) muestra una magnificación de 100 b) muestra una magnificación 200	23
Figura 4. Estructura granular de la Austenita a) muestra una magnificación de 100 b) muestra una magnificación 200	24
Figura 5. Estructura granular de la Martensita a) muestra una magnificación de 400 b) muestra una magnificación 800	25
Figura 6. Estructura granular de la Perlita a) muestra una magnificación de 400 b) muestra una magnificación 800	25
Figura 7. Principales Tratamientos Térmicos Aplicados a Aceros	32
Figura 8. Diagrama hierro carbono con zonas de diferentes tratamientos térmicos .	33
Figura 9. Diagrama de Fe-C	34
Figura 10. Etapas de los Tratamientos Térmicos	35
Figura 11. Diferentes velocidades de enfriamiento	35
Figura 12. Diagrama de Temperatura vs Tiempo del Temple	36
Figura 13. Tratamiento de Revenido	37
Figura 14. Proceso de cementación con temple directo	39
Figura 15. Reacción entre el medio cementante y la fase austenítica del acero	40
Figura 16. Esquema de la cementación iónica	42
Figura 17. Tipos de Horno	44
Figura 18. Maquina FOUNDRY-MASTER XPERT	47
Figura 19. Durómetro PHASE II	48
Figura 20. Ensayo con indentador cónico de punta de diamante (escalas A, C y D)	51
Figura 21. Dimensiones de la probeta.....	52
Figura 22. Mecanizado de las probetas.....	52
Figura 23. Desbaste de probetas	53
Figura 24. Caja de hierro fundida a) Dimensiones, b) Forma física.....	55
Figura 25. Precalentamiento del horno.	56
Figura 26. Calentamiento de la probeta	56
Figura 27. Permanencia de la probeta 1 hora.....	56

Figura 28. Enfriamiento de la probeta en aceite.	57
Figura 29. Precalentamiento del horno.	57
Figura 30. Calentamiento de la probeta	57
Figura 31. Permanencia de la probeta 2 horas	58
Figura 32. Enfriamiento de la probeta en aceite	58
Figura 33. Ciclo térmico mostrando del tratamiento superficial de cementando en el acero AISI 5115	59
Figura 34. Etapas de tratamiento Tenifer	60
Figura 35. Medidas de la dureza en el material AISI 5115, probeta 1, primer resultado	63
Figura 36. Curva de tendencia dureza vs horas de tratamiento de cementado.	64
Figura 37. Curva de tendencia espesor vs horas de tratamiento de cementado.	66
Figura 38. a) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 1 hora, b) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 2 horas, c) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 3 horas, d) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 4 horas.	66
Figura 39. Martensita revenida	67
Figura 40. a) Microestructura con escala de 20 μm b) microestructura con escala de 100 μm	67
Figura 41. Bosquejo de la probeta para ensayo de dureza Vickers.....	68
Figura 42. Medidas de indentaciones de probeta nitrurada a 2 horas	69
Figura 43. Medidas de indentaciones de probeta nitrurada a 4 horas	69
Figura 44. Curva de tendencia de Dureza vs horas de tratamiento de nitrurado.	70
Figura 45. a) Capa de espesor aproximado en un tiempo de permanencia de 2 horas en el tratamiento térmico de nitrurado b) Capa de espesor aproximado en un tiempo de permanencia de 3 horas en el tratamiento térmico de nitrurado.....	70
Figura 46. Ferrítica perlítica	71
Figura 47. a) Microestructura con escala de 100 μm b) microestructura con escala de 20 μm	71
Figura 48. Probeta de exposición de 4 horas	72
Figura 49. Curva de tendencia espesor vs horas de tratamiento de nitrurado.....	73
Figura 50. Grafica comparativa de dureza entre tratamientos	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Influencia de los Elementos Químicos en la Aleación de Acero	19
Tabla 2. Propiedades Mecánicas del material AISI 5115	20
Tabla 3. Composición Química del Material AISI 5115	29
Tabla 4. Aplicaciones industriales	30
Tabla 5. Especificaciones generales del tratamiento térmico superficial de cementado	59
Tabla 6. Medición de los elementos químicos de las probetas	61
Tabla 7. Comparación de elementos obtenidos con datos según proveedor	61
Tabla 8. Valores Obtenidos del Ensayo de Dureza Rockwell.....	62
Tabla 9. Valores de Dureza del Ensayo Rockwell en Probetas Cementadas	64
Tabla 10. Espesor de capa de dureza en probetas cementadas (mm).....	65
Tabla 11. Datos Obtenidos del Ensayo de Dureza Vickers.....	68
Tabla 12. Datos obtenidos de espesor en tratamiento de nitrurado.....	72
Tabla 13. Cuadro comparativo de dureza	73

RESUMEN

El material AISI 5115 es un acero utilizado en el medio local dentro de la industria automotriz, textil, agroindustrial, entre otras, para la fabricación de elementos mecánicos tales como Piñones, Rodillos, Levas, entre otros, los cuales trabajan sometidos a desgaste superficial y elevados esfuerzos mecánicos que a su vez necesitan gran tenacidad en el núcleo para un mejor desempeño.

Es por este motivo que a este tipo de material se lo trata térmicamente para darle un aumento de dureza superficial, como en este caso, en el que se diseñó y fabricó probetas de medidas: diámetro 50.8 mm, altura 25.4 mm, con un biselado de 0.2 mm, en la que posteriormente y bajo un diseño basado en documentos técnicos se aplicó los tratamientos térmicos superficiales de cementado y nitrurado para tiempos de exposición de 1, 2, 3 y 4 horas. Posterior a la aplicación de los tratamientos térmicos se realizó ensayos de metalografía y dureza, tanto en escala Rockwell como escala Vickers, esto basados en las normas ASTM E1-11, NTE INEN-ISO 6508-1, ASTM E384-17, respectivamente, mediante estos ensayos se pudo determinar que, al realizar los tratamientos, se obtuvo mejores resultados en dureza y espesor de capa en las probetas cementadas comparando bajo los mismos tiempos de exposición y de forma general.

Palabras clave: desgaste, tenacidad, esfuerzos, térmicamente, cementado y nitrurado.

ABSTRACT

The material AISI 5115 is a steel used in the local environment within the automotive industry, textile, agroindustrial, among others, for the manufacture of mechanical elements such as pinions, rollers, cams, among others, which work subject to surface wear and high mechanical efforts that in turn need great tenacity in the core for better performance.

It is for this reason that this type of material is treated thermally to give an increase in surface hardness, as in this case, which was designed and manufactured measuring specimens: diameter 50.8 mm, height 25.4 mm, with a beveled 0.2 mm, in which subsequently and under a design based on technical documents, the thermal treatments of cemented and nitrided were applied for exposure times of 1, 2, 3 and 4 hours. After the application of the thermal treatments, metallography and hardness tests were carried out, both in the Rockwell scale and the Vickers scale, based on the standards ASTM E1-11, NTE INEN-ISO 6508-1, ASTM E384-17, respectively, These tests were able to determine that, when carrying out the treatments, better hardness and layer thicknesses were obtained in the cemented samples comparing under the same exposure times and in a general way.

Keywords: wear, tenacity, efforts, thermally, cemented and nitrided.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad no se cuenta con información precisa sobre los procesos de tratamientos térmicos y el espesor de capa de dureza con relación al tiempo de aplicación de los tratamientos térmicos. Por este motivo se adquirió información necesaria para desarrollar y aplicar los distintos ensayos a los que fue sometido el material, tanto en su estado de suministro que nos provee el fabricante y en el pos tratamiento, con información detallada y de forma clara en el que cualquier persona lo pueda entender y aplicar.

Todo esto con el fin de realizar un análisis comparativo en el espesor de la capa superficial y la dureza obtenida del material AISI 5115 a diferentes tiempos de permanecía entre una a cuatro horas y poder compartir información a la industria mecánica y así tener la facilidad de seleccionar el tiempo y el tratamiento de acorde a su necesidad.

Para poder desarrollar este trabajo se inició adquiriendo el material para posteriormente validar su composición química y dureza, datos que el proveedor establece mediante un certificado, una vez realizado y verificado que el material AISI 5115 está dentro de los valores establecidos por el fabricante se procede a la aplicación de los tratamientos superficiales de cementado nitrurado y finalmente realizar ensayos de dureza Rockwell para el caso de probetas cementadas, así como el ensayo de dureza Vickers para probetas nitruradas, posterior a esto realizar ensayos de metalografía en el que se muestra el grano obtenido y su respectivo espesor de capa para los diferentes tiempos de permanencia.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar la dureza en el material AISI 5115 sometido a tratamiento térmico de cementado y nitrurado.

Objetivos específicos

- Estudiar la situación actual sobre el uso del material AISI 5115 y requerimiento de la resistencia mecánica en la industria metalmecánica.
- Validar la composición química y dureza del material AISI 5115 en estado de suministro empleando la técnica de espectrofotometría y medición de dureza.
- Diseñar y fabricar probetas de material AISI 5115 para la realización de tratamientos térmicos de cementado y nitrurado mediante literatura técnica.
- Diseñar y aplicar los tratamientos térmicos de cementado y nitrurado para el material AISI 5115 con tiempos de exposición de una, dos, tres y cuatro horas.
- Realizar un análisis comparativo del grado de dureza alcanzado en el material AISI 5115 cementado y nitrurado para los tiempos de exposición especificados.

CAPÍTULO 1

MARCO TEORICO

1.1. Aceros

El acero es una aleación de hierro que presenta unos pequeños porcentajes de otros elementos, principalmente hierro con concentraciones de carbono cercanas al 1%. También se tiene algunos aceros especiales que pueden contener diferentes elementos que se incorporan en pequeñas proporciones como: cromo (Cr), níquel (Ni), titanio (Ti), wolframio (W) o vanadio (V). [1]

El acero a diferencia del hierro posee una gran resistencia y además es más resistente a la deformación plástica, al incorporar el carbono al hierro, se forman estructuras cristalinas diferentes a la ferrita que es la que se encuentran habitualmente en el hierro, que ocasionan un gran incremento en su resistencia. Ésta característica del acero y la abundancia con que se encuentra en el planeta colocan a este material como el material básico del siglo XX. Cabe destacar que cerca del 92% de todo el acero es simple acero al carbono, el porcentaje restante son: acero aleado, aleaciones de hierro con carbono y otros elementos tales como magnesio, níquel, cromo, molibdeno y vanadio. [1]

1.1.1. Aceros al Carbono

El carbono tiene como función reducir la ductilidad del acero, esta propiedad se define como la capacidad que tiene un material para deformarse permanentemente, pero sin llegar a la ruptura. [2]

Los aceros al carbono están definidos como aleaciones de hierro y carbono los cuales se caracterizan por contener elementos químicos como son el manganeso y el silicio que se encargan de incrementar la resistencia del material a la oxidación, mientras que elementos como el azufre y el fósforo mantienen en un porcentaje muy bajo en los aceros por el motivo que son perjudiciales. [3]

Dentro de esta clasificación se encuentra en diversas concentraciones de los siguientes elementos de magnesio menos del 1,65%, de silicio menos del 0,60% y de cobre. Entre los productos fabricados con aceros al carbono se encuentran: carrocerías de automóvil, estructura de construcción de acero, cascos de buques, entre otros. [3]

La resistencia al variar el porcentaje de carbono se observa en la Figura 1.

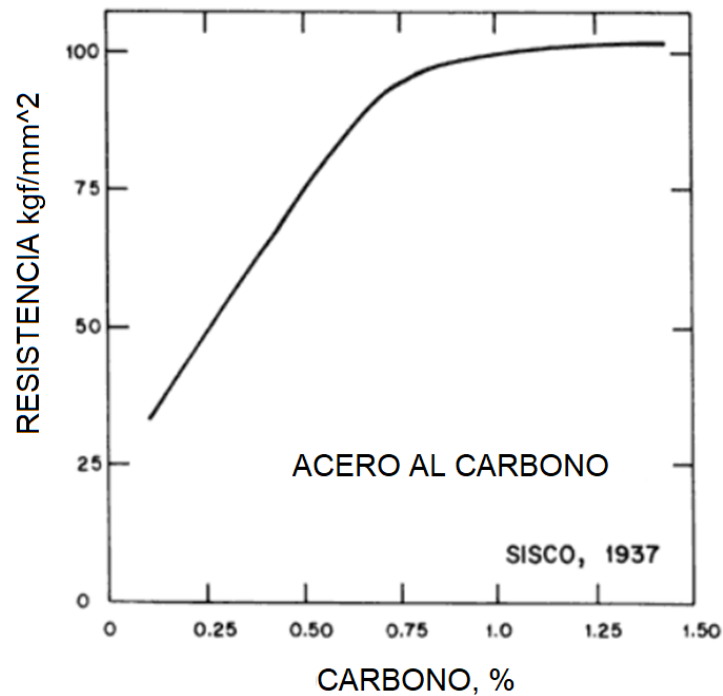


Figura 1. Efecto del contenido del carbono en la resistencia de los aceros [3]

El carbono tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico de los aceros. La resistencia de un acero simple con 0,5% de carbono es más de dos veces superior a la de otro con 0,1%. Además, como puede apreciarse en la Figura 1, si el contenido de carbono llega al 1%, la resistencia casi se triplica con respecto al nivel de referencia del 0,1%. [3]

1.1.2. Clasificación de los aceros según su contenido de Carbono

Según su contenido de carbono, los aceros se clasifican en:

- Aceros al Bajo Carbono
- Aceros de Medio Carbono

- Aceros de Alto Carbono
- Aceros de Ultra Carbono

1.1.2.1. Aceros de bajo carbono

Es importante mencionar que los aceros que presentan menos carbono contienen un porcentaje que varía desde 0,06% a 0,25%, se usan generalmente en fabricación de puentes de ferrocarril, estructura metálica de estaciones, columnas metálicas usadas para líneas eléctricas, partes metálicas de buques, cerraduras de puertas, estructuras metálicas de casas, carrocería para diferentes modelos de automóviles, tubos y estructuras de bicicletas, alfileres, clavos, asientos y entre otros objetos más. Los metales como el acero con menos carbono son utilizados en bruto, es decir como viene directamente de las acerías, sin la necesidad de realizarle algún tratamiento térmico en especial. [2]

En esta clasificación tenemos el acero AISI 5115, Abrams Engineering Services GmbH & Co. KG [4] indica que el material AISI 5115 se utiliza en la elaboración de máquinas en general, también puede ser utilizados para la producción de moldes para plástico, resina sintética, placas de base, barras de plegado, columnas guía, piezas de engranaje, piezas de articulación, ejes, engranajes, bielas, pernos del émbolo, árbol de levas, bulones, espigas.

1.1.2.2. Aceros de Medio Carbono

Los aceros de medio contenido de carbono son similares a los aceros de bajo carbono, con la diferencia en los porcentajes de carbono que para el acero de medio carbono son entre 0,30% a 0,60% y de 0,60% a 1,65% de manganeso. [5]

Este tipo de acero es seleccionado para aplicaciones donde son necesarias propiedades mecánicas mejores y generalmente llevan algún tipo de tratamiento térmico para aumentar la dureza. Son utilizados en una gran cantidad de piezas sometidas a cargas dinámicas. El contenido de carbono y manganeso, depende de una serie de factores. Como los siguientes: para aumentar las propiedades mecánicas, la templabilidad, usualmente se incrementa el 1% de carbono, el manganeso o ambos. Los aceros con el menor porcentaje de carbono son utilizados para piezas que son

deformadas en frío, y usualmente llevan un tratamiento térmico de recocido o normalizado antes de ser usados. También son usadas en piezas forjadas, la selección de este tipo de acero es en función del tamaño y propiedades mecánicas posterior al tratamiento térmico. Se encuentran desde SAE 1035 a 1053. [6]

1.1.2.3. Aceros de Alto Carbono

El acero con un alto contenido de carbono oscila desde 0,60% a 1,4% de carbono, el magnesio en la aleación oscila entre el 0,30% y el 0,90%. Los aceros de alto contenido de carbono son usados para algunas herramientas de mano, materiales de resorte y cables de alta resistencia. [5]

1.1.2.4. Aceros de ultra carbono

Estos aceros muy frecuentemente tienen un contenido de carbono de 1,25% a 2,0% y su microestructura es ultra fina, las cuales poseen granos equiaxiales esféricos. Estos aceros se procesan a menudo termo mecánicamente, realizando tratamientos térmicos. [5]

1.1.3. Aceros Aleados

Los aceros aleados son aquellos que tienen elementos como: carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre, usualmente contienen otros elementos en proporciones significativas como el cromo, níquel, molibdeno, etc., que ayudan a mejorar alguna de sus características específicas. [2]

Al incorporar estos elementos se presenta una variedad de efectos, y que pueden ser definidos al incorporarlos en proporciones convenientes, de esta forma se obtienen aceros con algunas características deseadas, que no pueden ser conseguidas con los aceros de uso común al carbono. Utilizando aceros aleados es factible fabricar piezas de grandes espesores, con una resistencia mucho más elevada en el interior que en las partes exteriores de las mismas. Generalmente los aceros aleados son usados en elementos de máquinas y motores ya que se necesita que sean capaces de soportar grandes durezas con gran tenacidad. [2]

1.1.3.1. Influencia de los Elementos de Aleación en los Aceros

Según Dóminguez Equiza [3] los elementos químicos se añaden a las aleaciones con el objetivo de obtener mayores beneficios como el incremento a la templabilidad, mejorar la resistencia al desgaste abrasivo, incrementar la resistencia a la oxidación y mejorar la tenacidad como la resistencia a la fatiga.

Tabla 1. Influencia de los Elementos Químicos en la Aleación de Acero [3]

Elementos Químicos	Símbolo	Consecuencia Sobre el Acero
Cromo	Cr	– Incrementa la resistencia a la oxidación y a la corrosión.
		– Aumenta la templabilidad.
		– Ayuda a mantener la tenacidad a cualquier temperatura.
Manganeso	Mn	– Se utiliza para desoxidar el acero en la fabricación
		– Aumentar la templabilidad.
		– Incrementa la resistencia al desgaste abrasivo en aceros templados.
Silicio	Si	– Proporciona elasticidad a los aceros.

1.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los materiales están ligadas a su composición química y de la microestructura, algunas de las principales propiedades mecánicas son, la dureza, esfuerzo, deformación elástica y plástica, entre otras. Las propiedades mecánicas que caracterizan al material AISI 5115 se pueden examinar en la Tabla 2. El acero AISI 5115 alcanza una dureza aproximada de 5 a 10 HRC. [7]

Tabla 2. Propiedades Mecánicas del material AISI 5115 [8]

Propiedades Mecánicas	
Tratado para la resistencia al frío, + S:	Disponible en condición de laminado
Suave recocido, + A:	máx. 207 HB
Tratada por fuerza, + TH:	156 - 207 HB
Tratada para ferrita y perlita. Estructura y rango de dureza. + FP:	140 - 187 HB
Densidad	7700-8030 kg/m ³

1.2.1. Ensayo espectrofotométrico

El ensayo espectrofotométrico se basa en un análisis cualitativo y cuantitativo de las calidades de metal. La probeta de metal a ser analizada se coloca en el soporte de la chispa y se sujeta con un dispositivo de sujeción. La probeta es activada con un arco generado eléctricamente en la superficie. Al descargar, un área de la superficie de la probeta se funde y se evapora por la chispa. Debido a la alta energía en la chispa, se genera el plasma. La luz generada por el plasma es analizada espectralmente y se mide por medio de CCD o también conocido como dispositivos de carga acoplada, chips semiconductores sensibles a la luz. [7]

Se puede asignar una sección específica del espectro medido a cada elemento. El instrumento en cuestión utilizando un software muestra el resultado del análisis en la pantalla de la PC conectada. El resultado del análisis se lo almacena en la base de datos interna o exportada. A través de cotejar los datos de calificación almacenados con los obtenidos del análisis, se puede determinar inmediatamente con qué desviaciones la calificación analizada cumple o no con las especificaciones requeridas. [7]

1.2.2. Ensayos de dureza

Según [9] al determinar la dureza en un material se lo hace a través de un ensayo de dureza, en el campo industrial específicamente se realizan ensayos cuantitativos. Estos ensayos son de penetración y es fundamental en la oposición de un material a ser deformado para lo que se emplea un indentador o penetrador. En los ensayos de penetración se mide el tamaño de la deformación que ha sido obtenida después de

haber aplicado una determinada fuerza sobre la superficie del material por medio del penetrador, ocasionando la deformación plástica. La dureza es obtenida mediante la una relación matemática entre la carga aplicada y el tamaño de la huella que dejó la deformación. A los equipos utilizados para determinar la dureza en un material se los conoce con el nombre de durómetros.

1.2.2.1. Ensayo de dureza Rockwell

Según Askeland [10] el ensayo de dureza Rockwell es un ensayo en el que utiliza una esfera de acero con un diámetro pequeño para materiales blandos y un cono de diamantes conocido como brale, que es usado para materiales duros. La profundidad de este penetrador es medida por una máquina para convertirla a un número de dureza de Rockwell (DR), la prueba de dureza Rockwell es la que más se utiliza ya que no necesita una medición óptica de las dimensiones de la indentación. Es una prueba relativamente rápida, fácil, económica y son medidas en milímetros o micrones (micras). En la Figura 2 se muestra la manera en que actúa las fuerzas sobre la probeta al momento de aplicar la carga predeterminada en un ensayo de dureza Rockwell mediante la norma NTE INEN-ISO 6508-1.

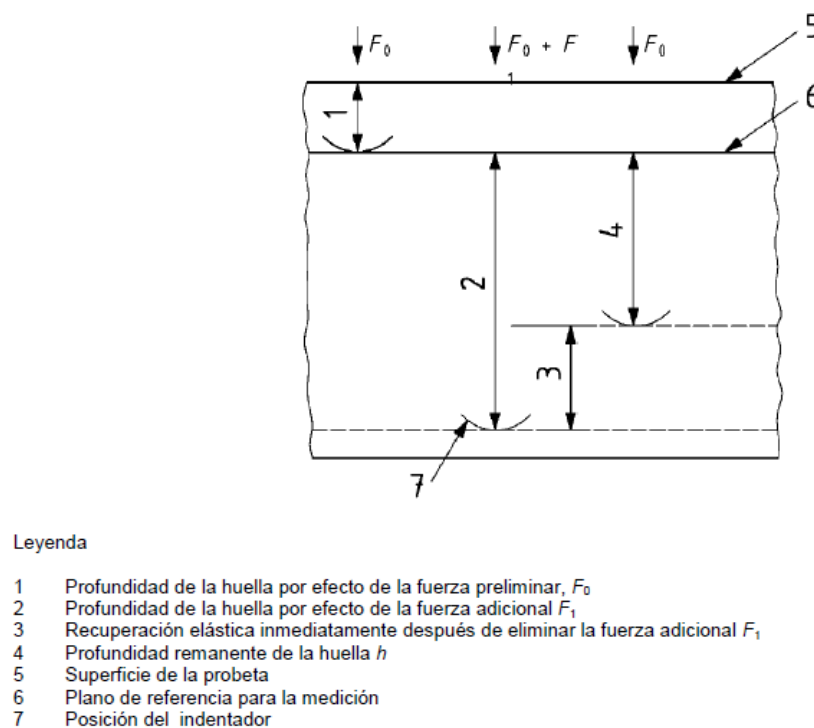


Figura 2. Diagrama del principio de Rockwell según la norma NTE INEN-ISO 6508-1 [10]

1.2.2.2. Ensayo de micro dureza Vickers

Según [11] a estos ensayos se los conoce como pirámide de diamante. Consisten en aplicar una carga forzando el indentador sobre la superficie de la pieza, las cargas que se aplican en este ensayo son menores a las que se aplican en ensayos como los de Brinell o Rockwell, las cargas están en un rango entre 1g y 100g. Posterior a la aplicación de la carga se analiza la marca que esta deja mediante el uso de un microscopio y se mide para convertirla en un número de dureza con la ayuda de una tabla establecida. Para utilizar este método se recomienda que la pieza se prepare mediante un desbastado y pulido. Los ensayos de Vickers son usados también en ensayos de materiales frágiles o cuando su capa de dureza es mínima.

1.2.3. Ensayo metalográfico

Este ensayo consiste en observar la microestructura para determinar las microconstituyentes que la componen, la microestructura varía con forme al tipo de muestra analizada y además depende de si se han realizado “tratamientos térmicos, procesos mecánicos, procesos de fabricación y otras formas de producción a los que haya sido sometido el material. En la mayoría de tipos aceros, se tiene los diferentes constituyentes como: austenita, ferrita, perlita, martensita, bainita, troostita, cementita, sorbita, steadita, ledeburita, y grafito”. [12]

En este ensayo se estudia de forma microscópica las características estructurales que posee “un metal o alguna aleación”, para determinar el tipo de microestructura que posee la probeta y los tratamientos térmicos a los que ha sido tratado, todo esto con el fin de identificar si el material es capaz de cumplir con los requerimientos para los que fue diseñado, además se permite identificar la presencia de material fundido, forjado y laminado. [12]

Mediante un ensayo metalográfico se puede conocer la distribución de fases que compone una aleación y las inclusiones no metálicas que se encuentran en la probeta, además se puede determinar presencia o ausencia de segregaciones. Mediante el microscopio se determina el tamaño de grano, además de su forma y la distribución de las diferentes fases e inclusiones que producen un determinado efecto muy marcado en las diferentes propiedades mecánicas de la probeta. La microestructura

que se observa mediante el ensayo revelará el tratamiento mecánico y térmico al que fue sometido el metal, y se podrá predecir su comportamiento esperado. [12]

1.2.3.1. Ferrita

La ferrita o también conocida como Hierro alfa α , considerado como hierro prácticamente puro, posee una resistencia aproximada de 280N/mm^2 . Es un material que puede contener “bario, hierro, boro, estroncio y molibdeno”. La ferrita al conjunto con la austenita y cementita son los micro-constituyentes más simples del sistema meta estable hierro-carbono. Tiene una característica de alta permeabilidad magnética, permitiendo obtener campos magnéticos con mayor fuerza magnética que el hierro y permite la producción piezas con una mayor resistencia y dureza, para esto antes deben ser moldeadas a presión y posteriormente calentadas, sin que se llegue a la temperatura de liquidus, este proceso es conocido como sinterización, en la Figura 3 se observa la estructura granular de la ferrita. [12]

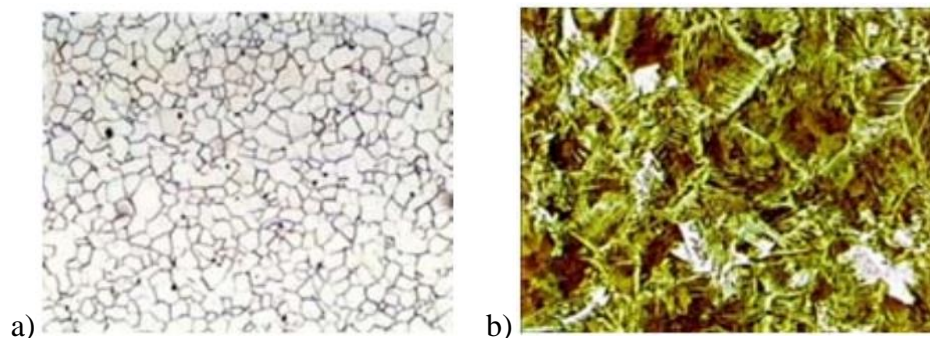


Figura 3. Estructura granular de la Ferrita a) muestra una magnificación de 100 b) muestra una magnificación 200 [12]

1.2.3.2. Austenita

La austenita es una solución sólida formada por carbono en hierro gamma. Puede contener cantidades desde 0,8% al 1,67% carbono, por esta razón se considera un constituyente de composición variable. La austenita es dúctil y blanda, sus propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción es de 100kg/mm^2 , puede alargamiento de hasta el 60% y posee una resiliencia que llega a ser del 30%, en las que las operaciones de forja y laminado de los diferentes aceros se realizan a una temperatura medio de 1100°C , en el punto en que la fase austenita se estabiliza. Su resistencia generalmente en la escala Brinell es de 300HB. Tiene propiedades no

mecánicas como la atracción y puede ser deformable, resistencia al desuso, en comparación con la ferrita y la austenita, no es un material ferromagnético a alguna temperatura, en la Figura 4 se observa la estructura granular de la ferrita. [12]

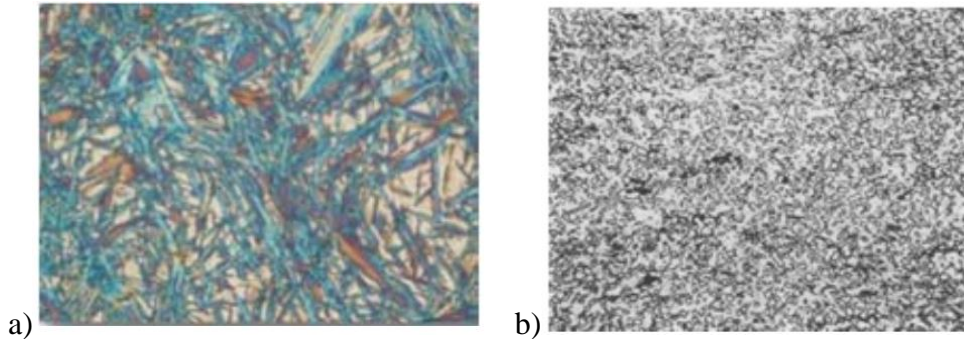


Figura 4. Estructura granular de la Austenita a) muestra una magnificación de 100 b) muestra una magnificación 200 [12]

1.2.3.3. Martensita

La martensita es una solución sólida típica de los aceros templados, saturada de carbono en hierro alfa, posterior a la cementita se transforma en uno de los constituyentes más duro de los aceros templados y se consigue gracias al enfriamiento rápido de los aceros desde una alta temperatura. [12]

El contenido de carbono varía desde pequeñas cantidades hasta 1% de carbono. Su dureza está en función del porcentaje de carbono que contiene en su solución y tiene valores aproximadamente de entre 25HRC y 67HRC, posee una resistencia a la tracción de 170 a 250kg/mm² y un alargamiento del 0,5% al 2,5%, es bastante frágil y además es magnética. [12]

La resistencia de la martensita se la puede atribuir a los esfuerzos de tensión que se genera en sus cristales, la deformación es similar a la de los metales deformados en frío, donde se genera por los granos deformados y la tensión genera un aumento de dureza, la estructura granular se observa en la Figura 5. [12]

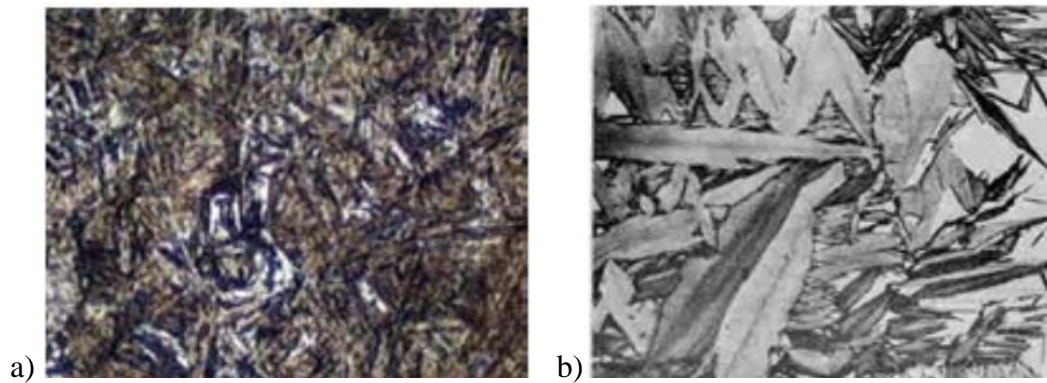


Figura 5. Estructura granular de la Martensita a) muestra una magnificación de 400 b) muestra una magnificación 800 [12]

1.2.3.4. Perlita

La perlita es un constituyente compuesto aproximadamente por el 86,5% de ferrita y el 13,5% de cementita. Su microestructura se conforma por capas o láminas alternas de las fases antes descritas y generada durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Su nombre proviene de su apariencia similar al de una perla que puede ser observada microscópicamente a pocos aumentos. Al ser la fase predominante la ferrita, sus propiedades mecánicas estarán más próximas a las de la ferrita, a continuación, en la Figura 6 se tiene la estructura granular de la perlita.

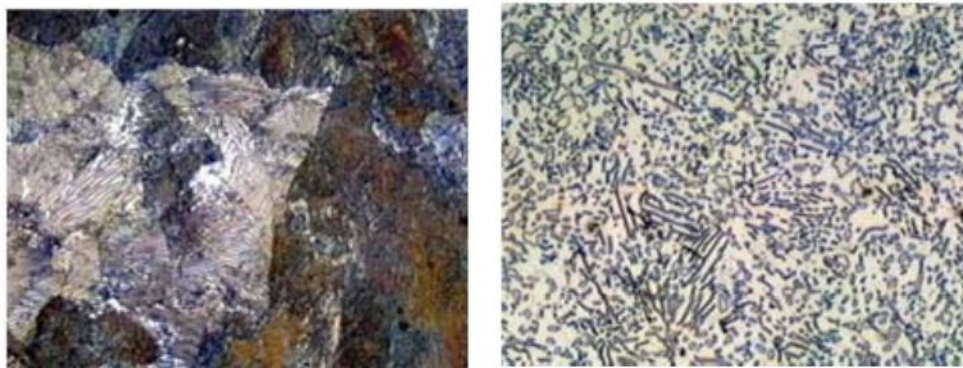


Figura 6. Estructura granular de la Perlita a) muestra una magnificación de 400 b) muestra una magnificación 800 [12]

1.2.3.5. Ataque de las probetas

Para poder realizar el ensayo metalográfico mediante el microscopio y poder determinar la estructura de los aceros, es fundamental tener una probeta pulida en la cual solamente se observen la inclusión no metálica incrustadas en una masa blanca y brillante. En algunas ocasiones, se observa de forma ligera un relieve que es

producido por la desigual dureza de los constituyentes, para posteriormente atacar la probeta de modo que sea posible observar su estructura cristalina. [13]

Para descubrir la estructura microscópica en este tipo de acero se utilizó ácido pícrico (picral), ya que es requerido para todos los grados de aceros al carbón recocidos, templados y revenidos.

1.3. Aceros para endurecimiento superficial

1.3.1. Aceros para cementación

Los aceros que mejor responden a la cementación son aquellos que poseen un bajo contenido de carbono y conservan tenacidad en su núcleo. Existen los aceros para cementación que, según su requerimiento de dureza y resistencia mecánica, pueden ser clasificados de la siguiente forma:

- Aceros para cementación al carbono.
- Aceros para cementación al cromo-níquel (Cr-Ni) de 125kgf/mm².
- Aceros para cementación al cromo-molibdeno (Cr-Mo) de 95kgf/mm².
- Aceros para cementación al cromo-níquel-molibdeno (Cr-Ni-Mo) de 135kgf/mm².

1.3.1.1. Aceros para cementación al carbono.

La cementación para los aceros al carbono se la realiza a temperaturas entre “900 °C y 950°C, el tratamiento de temple se lo efectúa a temperaturas de entre 875°C y 925°C en agua o aceite, el siguiente tratamiento de temple se lo realiza a temperaturas de entre 925°C y 775°C en agua, y el tratamiento de revenido se realiza a una temperatura que no debe sobrepasar los 200°C”. [12]

Se lo realiza en piezas con cargas bajas con poca resistibilidad, de espesor reducido, y de escasa tenacidad en el núcleo. [12]

1.3.1.2. Especificaciones de los aceros para cementación al cromo-níquel (Cr-Ni) de 125kgf/mm².

Estos tipos de acero tienen composición química de cromo del “1% y de níquel de un 4,15%. El tratamiento térmico de cementación se realiza entre temperaturas de 850°C

y 900°C, primero se realiza el tratamiento de temple a temperaturas de entre 825°C y 900°C en aceite, después el tratamiento de temple se realiza a temperaturas de entre 725°C y 800°C, y el tratamiento de revenido se realiza a una temperatura que no debe sobrepasar los 200°C”. Es usado para piezas de gran dureza en el núcleo y buena tenacidad. Así como diferentes partes de máquinas y motores, engranajes y levas [12].

1.3.1.3. Especificaciones de los aceros para cementación al cromo-molibdeno (Cr-Mo) de 95kgf/mm².

Este tipo de acero presenta la siguiente composición química: “1,15% de cromo y un 0,20% de molibdeno. El tratamiento térmico de cementación se realiza a temperaturas de entre 875°C y 950°C, primero se realiza el tratamiento de temple a temperaturas de entre 875°C y 900°C en aceite, después el tratamiento de temple se efectúa a temperaturas de entre 775°C y 825°C en aceite, y por último el tratamiento de revenido debe ser realizado a una temperatura que no exceda los 200°C. Es usado para piezas de automóviles y maquinaria con necesidad de gran dureza superficial y núcleo resistente. También en elementos que están expuestos a grandes desgaste y esfuerzos, como; engranajes, levas”. [12]

1.3.1.4. Aceros para cementación al cromo-níquel-molibdeno (Cr-Ni-Mo) de 135kgf/mm².

Los aceros para cementación Cr-Ni-Mo, contiene los diferentes elementos en estas proporciones cromo de 0,65%, níquel 0,4%, y molibdeno 0,25%. Las características del tratamiento térmico de cementación son:

- Temperaturas de entre 850°C y 950°C, el tratamiento de temple se efectúa a temperaturas de entre 825°C y 875°C en aire o aceite. [14]
- Después el tratamiento de temple se efectúa a temperaturas de entre 725°C y 775°C en aceite. [14]
- El tratamiento de revenido a una temperatura que no exceda los 200°C. Es usado para elementos de grandes dimensiones con necesidad de elevada resistencia y dureza superficial. [14]

- Además, se usa en motores de máxima responsabilidad., ruedas dentadas, etc.
[12] Un acero usado al cromo-níquel-molibdeno usado para cementación es el SAE 8620. [14]

1.3.2. Aceros para Nitruración.

Para realizar el proceso de nitrado se debe realizar una selección ya que no todos los aceros pueden ser usados para ello, en algunas ocasiones este tratamiento puede resultar perjudicial, como ocurre con aceros al carbono, en los mismos que el nitrógeno ingresa a una velocidad muy elevada y produciendo que la capa nitrurada tienda a desprenderse. Para la nitruración resulta conveniente que el acero este compuesto con una cierta cantidad de aluminio cercana al 1%. “Este tratamiento puede ser usado con aceros al cromo níquel, ciertas fundiciones con aluminio o al cromo y con los aceros inoxidable”. A continuación, se presenta algunos aceros usados en la nitruración:

- Acero para nitruración al Cr-Mo-V de alta resistencia, como el acero RLM VCMo 230.
- Acero para nitruración al Cr-Mo-V de media resistencia, como el acero RLM VCMo 135
- Acero para nitruración al Cr-Al-Mo de alta dureza, son parte de la familia de aceros aleados 41XX, un acero que es ejemplo de esta familia es el acero SAE 4130

1.3.2.1. Especificaciones del acero para nitruración al Cr-Mo-V de alta resistencia.

Los aceros usados para este proceso de diferencia por lo siguiente: 0,32 % C, 3,25% Cr, 0,40% Mo y 0,22% V. Posterior al tratamiento térmico se alcanza una resistencia mecánica de 120 kg/mm². La capa generada por la nitruración se adhiere de forma adecuada, suele ser usado en la construcción de piezas de gran resistencia y además de elevada dureza superficial que necesiten resistir el desgaste. [12]

1.3.2.2. Especificaciones del acero para nitruración al Cr-Mo-V de resistencia media.

Este acero tiene una composición de 0,25% C, 3,25% Cr, 0,40% Mo y 0,25% V. Las características y aplicaciones son similares a las del acero de alta resistencia, cabe mencionar que tiene una resistencia mecánica es de 100kg/mm². [12]

1.3.2.3. Especificaciones del acero para nitruración al Cr-Al-Mo de alta dureza.

Este acero está constituido por 0,40% C, 1,50% Cr, 0,20% Mo y 1% Al. En este caso la capa nitrurada en este tipo de acero puede tender a descascararse y además tiene una elevada fragilidad. Es usado para piezas que requieren una resistencia media y tengan elevadas sollicitaciones en la superficie. [12]

1.3.3. Acero AISI 5115

El acero AISI 5115 también identificado como DIN 16MnCr5 y conocido en las industrias Metalmecánica del Ecuador como el material E410. Según IVAN BOHMAN C.A. este tipo de material cuenta con un núcleo de gran resistencia y excelente tenacidad, es utilizado en situaciones donde se necesite una alta dureza y un buen aguante al desgaste superficial. [7]

Tabla 3. Composición Química del Material AISI 5115 [7]

Análisis típico %	C	Si	Mn	Cr
16MnCr5	0,14-0,19	< 0,30	1,00-1,30	0,80-1,10
AISI 5115	0,13-0,18	0,15-0,35	0,70-0,90	0,70-0,90

Dominguez Equiza alega [3] que componentes químicos en la aleación de los aceros se utilizan para obtener beneficios, tales como, incrementar la capacidad de endurecimiento, aumentar las propiedades mecánicas, agrandar la resistencia a la oxidación y al desgaste.

1.3.4. Aplicación industrial del material AISI 5115

El material AISI 5115 es un acero de aleación, en el que sus principales usos se encuentran dentro de la industria automotriz, en maquinaria, etc., se fabrican elementos tales como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Aplicaciones industriales [7]

Aplicaciones del material AISI 5115	
Piñones	Pernos con exigencias de dureza exterior
Ejes estriados	Columnas
Cigüeñales	Pines detractores
Engranajes de reducción	Piezas duras de maquinaria en general.
Cojinetes	

1.3.4.1. Estudio actual del uso del material AISI 5115

Para evaluar el uso del material dentro de la industria en la ciudad de Quito, se realizó encuestas, las cuales fueron obtenidas por información brindada por las empresas MAYPROM Diseño y Fabricación, Cooperación Técnica Industrial, donde se pudo determinar que el material AISI 5115 se emplea en un 15% para la fabricación de elementos como: Piñones; Rodillos y Levas, entre los más fabricados. Los resultados de las encuestas se pueden observar en el Anexo I.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Difusión en sólidos

La difusión se refiere al flujo neto de cualquier especie, como iones, átomos, electrones, orificios y moléculas, la magnitud de este flujo en función del gradiente de concentración y la temperatura. Este movimiento de los átomos se produce en posición reticular a otra o también se produce de una posición intersticial a otra. La movilización de los átomos en metales puros o en elementos bases también es llamada “difusión propia”, la difusión que se produce en un metal y en elemento de aleación con otro metal que cumple la función de base, es conocida como “difusión sustitucional”. [15], [10]

El movimiento de los átomos que se producen en el interior de los sólidos metálicos, para la difusión propia y difusión sustitucional, en función de que en la estructura cristalina se tenga “sitios vacantes o vacancias”, estas vacancias son consideradas como un defecto que está presente a lo largo del metal y que varía en función de la temperatura, la dependencia de las mismas tiene una forma exponencial, que implica a mayor temperatura mayor será la cantidad de sitios vacantes, al mismo tiempo se produce el aumento en la difusión atómica, también tiene que ser considerado que a mayor temperatura mayor energía tienen los átomos, produciendo un aumento de la frecuencia de salto de los mismos de un lugar vacante a otro. Como regla general, se puede determinar que el coeficiente de difusión se duplica por cada 20°C de aumento en la temperatura. [15]

2.2. Tratamientos térmicos

El concepto de los tratamientos térmicos definido por Sánchez & Campos [16] consiste en hacer más resistente al material, es un proceso térmico de calentamiento y enfriamiento que es realizado con el propósito de mejorar las propiedades del material tal que este incremente la seguridad y el tiempo de vida de una pieza, esto se

debe a la modificación de la microestructura del material. Los tratamientos térmicos son definidos por el ciclo térmico que pasan y no por las propiedades que se logran con tratamiento. En cada tratamiento térmico en particular los parámetros que deben ser fijados son: la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a dicha temperatura y la velocidad de enfriamiento.

Las temperaturas para el tratamiento térmico siempre deben ser inferiores a la temperatura de fusión para que haya un cambio en la microestructura y no de fase en la aleación considerada. El calentamiento de la pieza se debe realizar a baja velocidad y lo más uniforme posible, en especial para piezas con espesores considerables, con el fin de no generar tensiones internas entre las secciones exteriores y más lejanas de la fuente de calor, teniendo en cuenta que el ideal es que la temperatura en el centro y en la periferia de la pieza sea la misma. [16]

La finalidad de realizar un tratamiento térmico es producir cambios microestructurales sin modificar su composición química del material. En la Figura 7 se observa los principales tratamientos térmicos utilizados en la industria. [16]

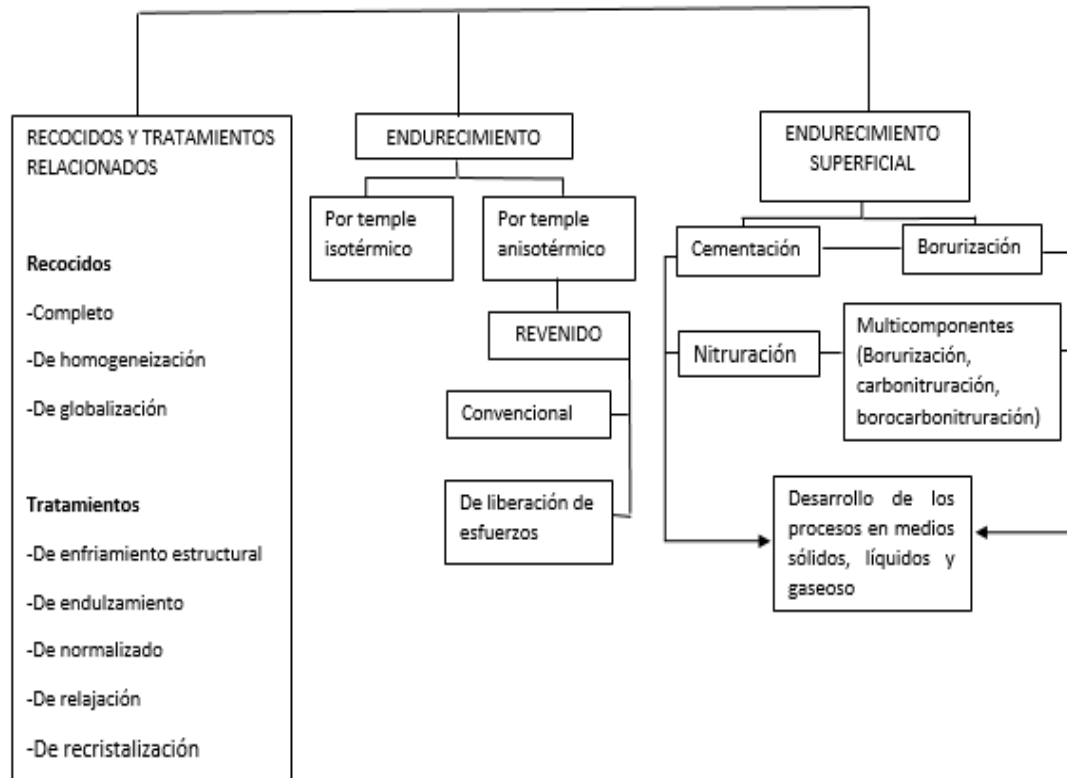


Figura 7. Principales Tratamientos Térmicos Aplicados a Aceros [16]

En el diagrama hierro-carbono es posible ubicar las zonas en las que se realiza los diferentes tratamientos térmicos como se observa en la Figura 8.

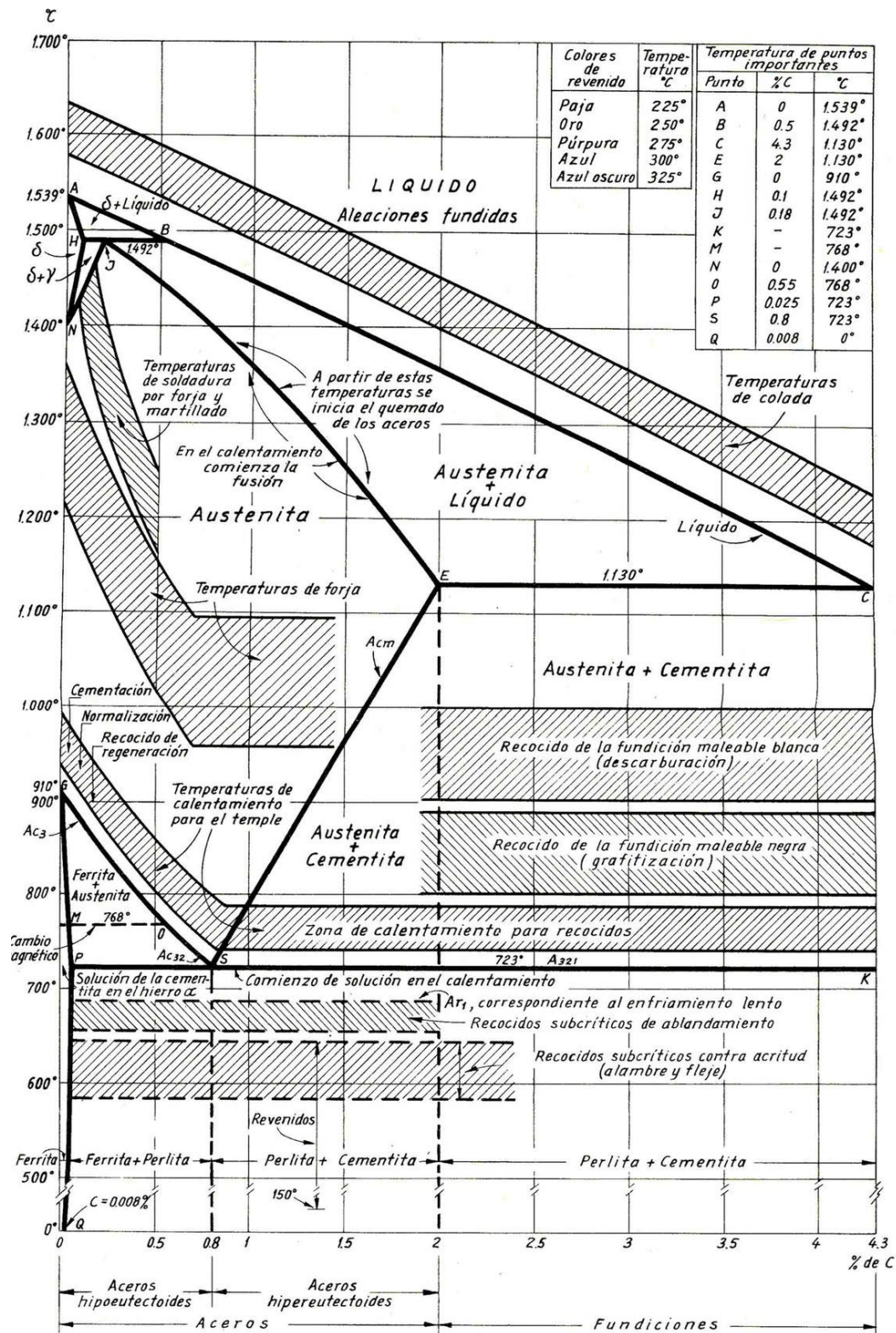


Figura 8. Diagrama hierro carbono con zonas de diferentes tratamientos térmicos [18]

La base fundamental para entender los tratamientos térmicos es el diagrama de fases Fe-C, en donde las variables principales son la temperatura y el porcentaje de carbón, la Figura 9 muestra el diagrama Fe-C, el cual se utiliza para determinar las fases que se desarrollarán cuando el acero es enfriado en el equilibrio térmico. [17]

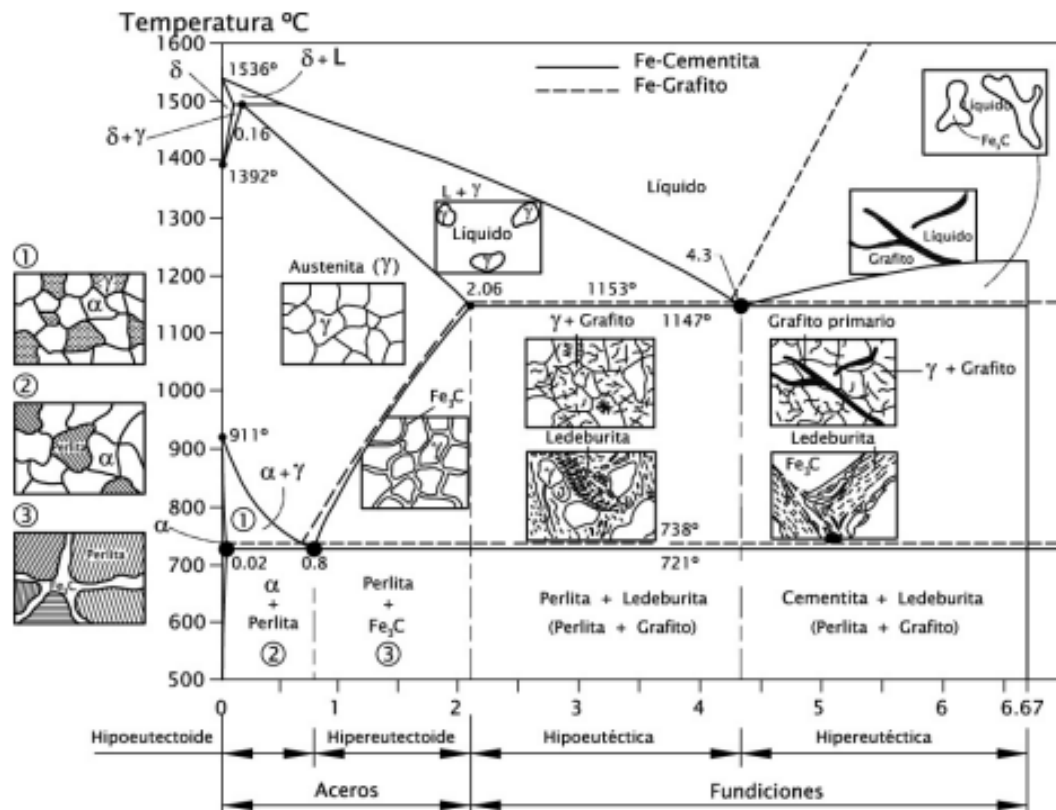


Figura 9. Diagrama de Fe-C [17]

2.3. Variables de los tratamientos térmicos

Al efectuar un tratamiento térmico se controla dos variables principales que son la temperatura y el tiempo, estas variables varían en función del tipo de tratamiento térmico que se va a realizar, así como el material de la probeta a la que se pretende realizar el tratamiento térmico. [19]

2.4. Etapas de los tratamientos térmicos

Según [20] los tratamientos térmicos constan de tres etapas las cuales se observa a continuación en la Figura 10.

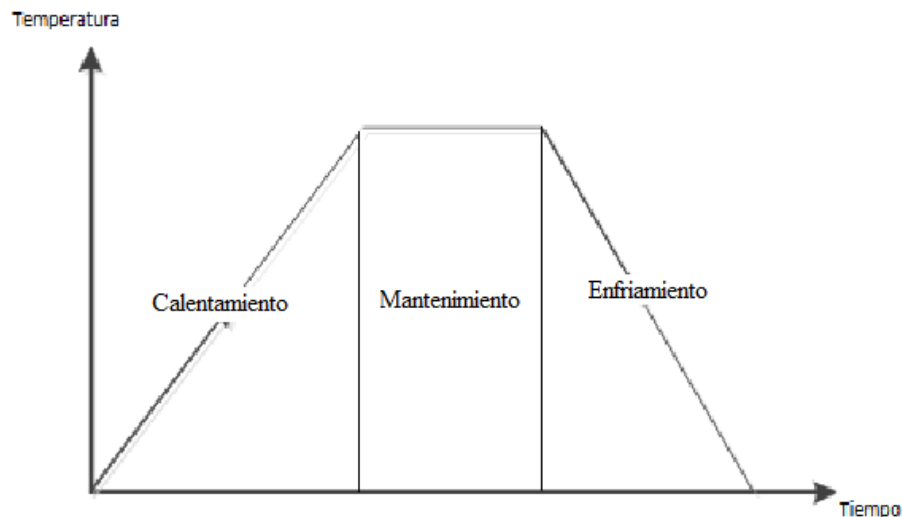


Figura 10. Etapas de los Tratamientos Térmicos [20]

- Calentamiento: la elevación de temperatura debe de ser uniformemente, para lo cual la temperatura es elevada muy lentamente.
- Permanente o Mantenimiento: esta se refiere a cuando una temperatura designada se ejerce sobre una pieza un tiempo estimado.
- Enfriamiento: en la cual se procede a dejar enfriar un material designado dependiendo que tipo de tratamiento térmico se desee dar.

Dependiendo de la velocidad de enfriamiento se tiene los diferentes tratamientos térmicos, cuando se tiene un rápido enfriamiento es conocido como temple, si la velocidad es un poco menor se considera normalizado y por último el recocido es el tratamiento que necesita el mayor tiempo de enfriamiento. [20]

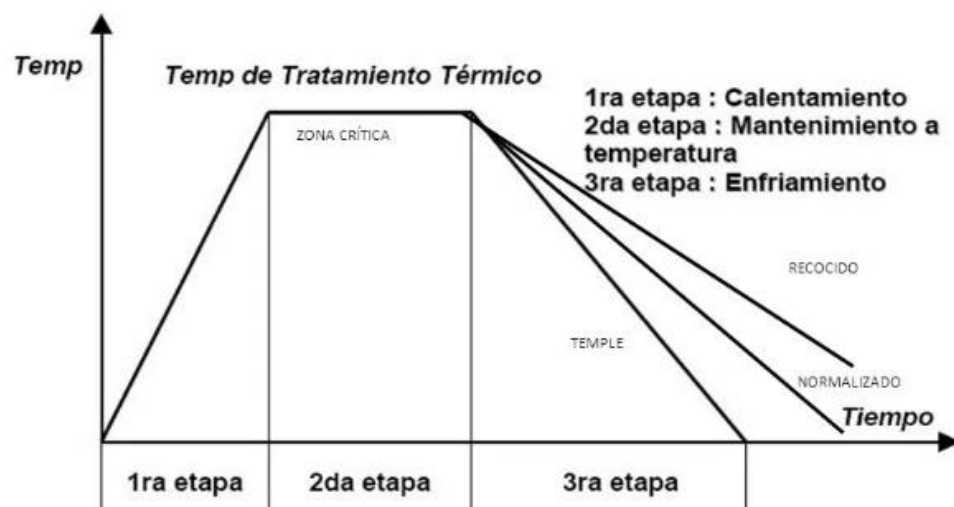


Figura 11. Diferentes velocidades de enfriamiento [20]

2.5. Tipos de Tratamientos Térmicos

2.5.1. Temple

El concepto de temple definido por Tecnología Industrial II se caracteriza por un enfriamiento rápido el cual se lo puede realizar mediante agua, aceite o aire. El tratamiento térmico de tipo martensítico conocido como temple aumenta la dureza, pero se disminuye la tenacidad y alargamiento unitario, como se muestra en la Figura 12. El procedimiento del temple a seguir son el calentamiento, permanencia o mantenimiento y enfriamiento rápido. [21]

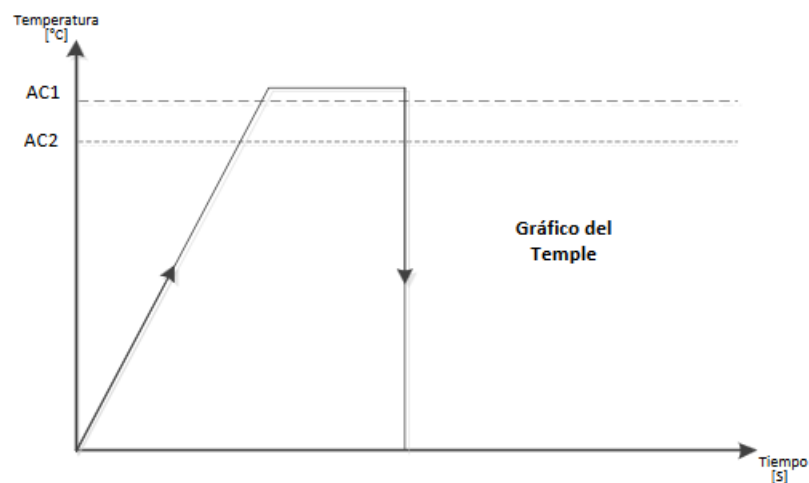


Figura 12. Diagrama de Temperatura vs Tiempo del Temple [21]

Los aceros que tienen presente un contenido de carbono entre el 0% y 0,8% se los denominan aceros hipoeutectoides, por estar detrás del punto eutectoide, en este caso la temperatura de austenización es $Ac_3 + 50^\circ\text{C}$. Mientras que los aceros con contenido de carbono entre 0,8% a 2,06% se los denominan aceros hipereutectoides, no sobrepasan la temperatura de austenización la cual está dada con el valor de A_{cm} , la cual varía desde 723°C hasta 1130°C . [22]

En base al proceso seguido se tiene algunos tipos de temple para el acero los cuales se determinan a continuación:

2.5.1.1. Temple estructural o martensítico

El proceso trata de elevar la temperatura por encima de la temperatura crítica y mantenerlo el tiempo suficiente, se realiza un enfriamiento que sea rápido y

continuo. De acuerdo al acero ya sea hipoeutéctoides su constituyente final es martensita o hipereutectoide su constituyente final es cementita. [21], [22]

2.5.1.2. Temple Martempering

Se trata de aumentar una temperatura hasta el punto de austenización y mantenerla hasta un debido tiempo ya establecido, después se enfría bruscamente hasta una temperatura en que se produzca el inicio de transformación de la austenita en martensita para obtener la martensita. Es utilizado para evitar deformaciones y grietas de la transformación martensítica. Se debe calentar la pieza de 860°C a 920°C y mantener la temperatura un tiempo específico. [21], [22]

2.5.1.3. Temple Austempering

Consiste en mantener una temperatura adecuada en un tiempo determinado para obtener la austenita, luego se enfría bruscamente mediante un baño de sales hasta una temperatura establecida y se procede a disminuir la temperatura hasta que todo el material se transforma en bainita, en este proceso se calienta hasta temperaturas de austenización que van desde 860°C hasta 920°C. [5]

2.5.2. Revenido

Según [23] el tratamiento térmico del revenido funciona como un complemento del temple ya que este consiste en disminuir la fragilidad del material y ayuda a cambiar las características mecánicas, reduciendo la dureza y la resistencia a la rotura, así como mejorando las siguientes propiedades: aumentando tenacidad y plasticidad. Se observa el tratamiento de temple y revenido en la Figura 13.

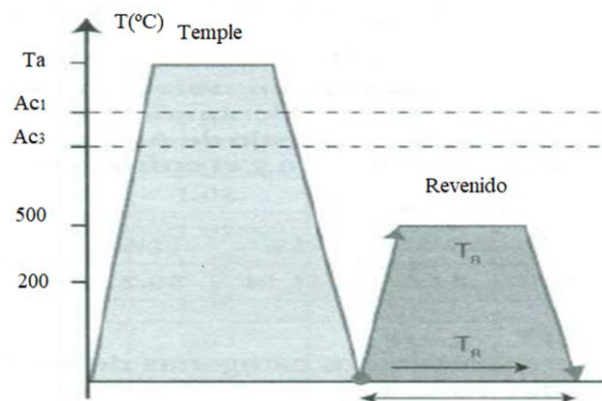


Figura 13. Tratamiento de Revenido [16]

Por lo general el rango de temperaturas va desde 200°C a 450°C, esta es una zona que divide entre los usos que requieren como propiedad predominante la dureza y aquellas que necesitan una mayor tenacidad. Para las aplicaciones donde la principal propiedad que se desea es la dureza o resistencia al desgaste del elemento se realiza un revenido a menos de 200°C, para estas condiciones los esfuerzos producidos por el temple disminuyen notablemente cuando las probetas llegan a los 200°C. Por otro lado, si lo que se quiere es que la tenacidad se vea mejorada, la pieza debe ser revenida por arriba de los 450°C, a estas temperaturas prácticamente se logra que todos los esfuerzos internos o residuales desaparezcan. Es de vital importancia analizar la transformación de la martensita al calentar el acero en las zonas antes especificadas. [15]

2.5.3. Normalizado

El normalizado tiene como objetivo afinar la estructura cristalina del metal y reducir las tensiones que se generan a partir de la solidificación. El normalizado consiste en calentar el metal hasta la temperatura de austenización, para después dejarlo enfriar al aire. La cualidad que tiene este tratamiento frente al recocido es que produce una estructura granular más fina y además una mejor resistencia mecánica. [21], [24]

2.5.4. Recocido

El recocido según [25] y [24] esta referido a un tratamiento térmico utilizado para ablandar el acero, también puede ser usado para regenerar su estructura o eliminar tensiones internas producidas por otros tratamientos. Los beneficios que genera este tipo de tratamiento térmico es un mecanizado más sencillo y se convierte en un mejor conductor eléctrico.

2.6. Tratamientos térmicos superficiales

Según [10] mediante la aplicación apropiada de tratamientos térmicos superficiales es posible obtener una estructura dura y fuerte en la superficie del material, ayuda a que el material tenga una buena resistencia al desgaste y fatiga, pero al mismo tiempo un núcleo blando, dúctil y tenaz que proporcione una buena resistencia a la falla por impacto.

2.6.1. Cementación

La cementación es un tratamiento térmico superficial que trata de calentar la pieza de acero de bajo carbono a unas temperaturas que oscilan entre 900-950°C bajo la presencia de una atmósfera carburante que está conformada por dióxido de carbono y monóxido de carbono con el fin de generar carbono en la superficie de la aleación, el mismo que ingresa por difusión en el acero. Tras la penetración de 1mm o más milímetros se procede a temprar la probeta. [24]

Los aceros a ser cementados poseen un porcentaje bajo de carbono (0,15% – 0,23%), por medio de un proceso de cementación la dureza en el material puede aumentar hasta valores aproximados a 62-63HRC si el porcentaje de carbono aumenta en 0,90% en la parte superficial. La difusión del carbono es mayor si la diferencia de concentración y la temperatura son altas, por este motivo la cementación se realiza a temperaturas superiores a los 900°C. Como se muestra en la Figura 14. [9]

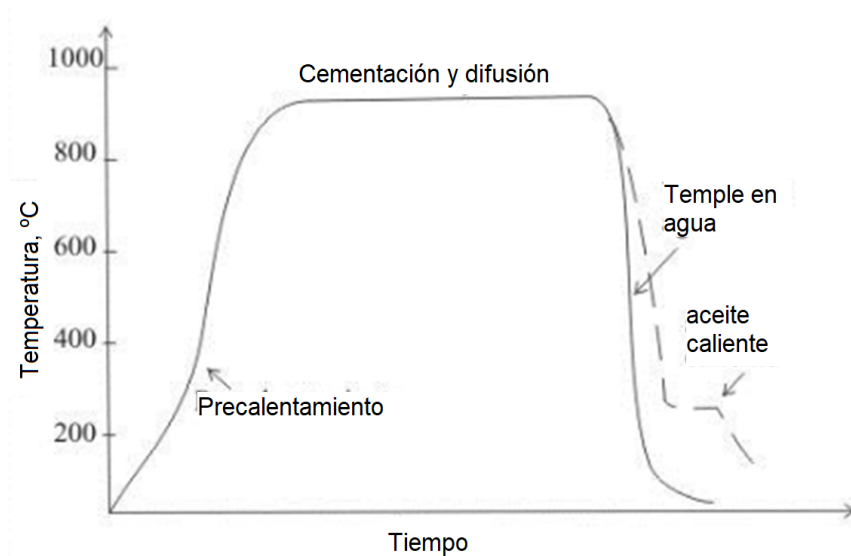


Figura 14. Proceso de cementación con temple directo [26]

Después de conseguir el incremento deseado de carbono se realiza el proceso de temple para que la superficie y núcleo de la pieza adquiriera una estructura martensítica que asegura una resistencia muy buena al desgaste superficial y buenas propiedades de resistencia a la fatiga en el núcleo. Las piezas que se tratan habitualmente por cementación son: engranes, bulones, ejes bielas palieres, coronas y grupos diferenciales. [27]

Durante el proceso de cementación se llevan a cabo dos sucesos de forma simultánea. Por un lado, se produce una reacción en el ambiente que causa la aportación de carbono a la superficie, por otro lado, el carbón absorbido se va difundiendo hacia el interior del acero. Explica varios tipos de procesos de cementación, entre las más comunes se encuentran la cementación sólida, la cementación líquida, la cementación gaseosa, la cementación a presión reducida y la cementación iónica. La reacción se observa en la Figura 15. [27]

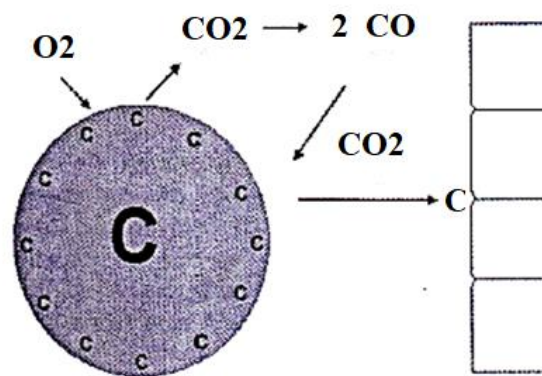


Figura 15. Reacción entre el medio cementante y la fase austenítica del acero [27]

2.6.1.1. Cementación sólida.

La cementación es un tratamiento termoquímico austenítico que es usado en los aceros de bajo carbono, es decir con un contenido menor de 0,25%, el mismo que no ha sido templado previamente con el objetivo de incrementar el contenido de carbono a porcentajes superiores al 0,8% en la capa superficial del acero. El material en cuestión se austeniza en una atmósfera o en un ambiente rico en carbono, que es difundido hacia el interior de la pieza, permitiendo a la austenita disolver altos porcentajes de éste. Para conseguirlo se debe someter al carbono en su forma básica a altas temperaturas 900°C -950°C, con esto se produce la difusión de los átomos de carbono dentro del material de la pieza. [27]

Su aplicación está basada en la combustión y disociación de un cementante en estado sólido en una atmosfera con pequeños porcentajes de oxígeno, con el fin de generar una buena cantidad de monóxido de carbono, el CO es un gas reactivo que tiene la capacidad de descomponerse en carbono y en dióxido de carbono, esta última reacción es la que rige el proceso de cementación. [27]

2.6.1.2. *Cementación líquida*

La cementación líquida es un método más rápido y eficaz que consiste en realizar un baño de sales fundidas con cianuros de sodio o bario con el fin de que se descompongan en carbono y nitrógeno activos, que a su vez se difunden hacia el interior del material. Es un método utilizado en los países de primer mundo que tiende a quedar obsoleto debido a los problemas ecológicos que genera. [27]

2.6.1.3. *Cementación gaseosa*

La cementación gaseosa se consigue mediante la disociación de hidrocarburos como: metano, propano, gas natural y a la utilización de algunos solventes orgánicos como: alcohol, isopropílico, metanol y acetona en condiciones poco oxidantes. En este método se usan hornos y cámaras cerradas, la cementación gaseosa a comparación de la cementación líquida es menos ágil pero más segura para el medio ambiente, debido a que se realiza en hornos cerrados. [27]

2.6.1.4. *Cementación a presión reducida*

Esta cementación es un proceso de disociación en el que interviene uno o varios hidrocarburos a alta temperatura, con mucha frecuencia se usan propano como gas carburante, que se disocia en metano y etileno. En éste proceso el compuesto principal es el etileno, que tiene facilidad para descomponerse a temperaturas elevadas en carbono e hidrógeno, la cinética del gas depende de la temperatura, del caudal y de la superficie que se vaya a tratar, otras variables a controlar en el proceso es la presión total y parcial del hidrocarburo. [27]

2.6.1.5. *Cementación iónica*

La cementación iónica es realizada en hornos de vacío con la utilización de un mecanismo de generación de plasma, las paredes del horno actúan como ánodo y la pieza o probeta como cátodo tal como se muestra en la Figura 16. [27]

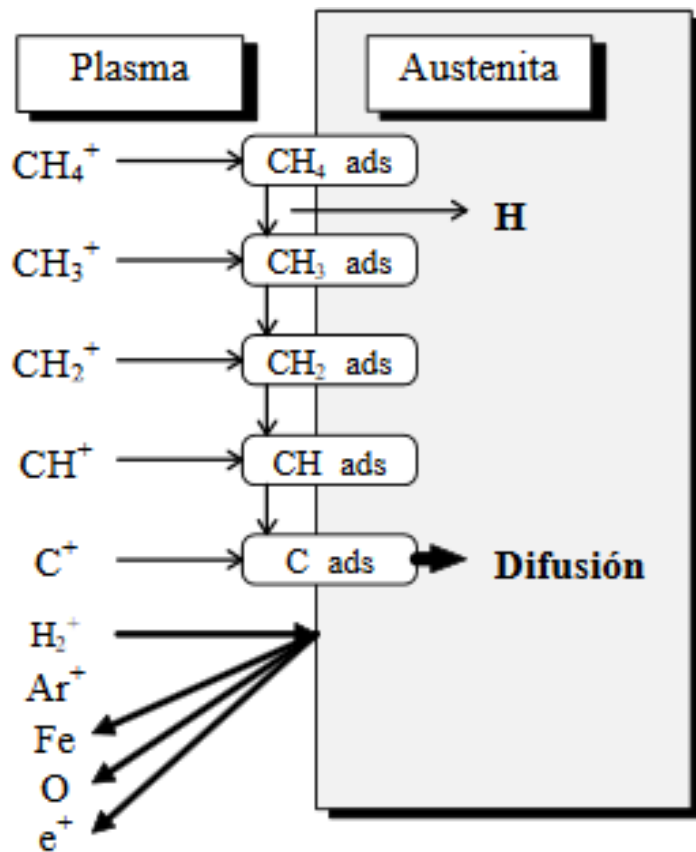


Figura 16. Esquema de la cementación iónica [27]

Después de conseguir un grado de vacío elevado y calentar las piezas a ser cementadas se introduce hidrocarburos gaseosos a baja presión, todo esto genera átomos de carbono que son proyectados a gran velocidad contra la superficie a cementar, con este método se obtiene porcentajes de carbono y profundidades de capa muy precisos. [27]

2.6.2. Nitruración

La nitruración es un proceso termoquímico que tiene la finalidad de endurecer la superficie del acero, mediante la difusión de nitrógeno atómico. A diferencia de la cementación, la nitruración se la realiza en aceros con estructura ferrítica, mediante el calentamiento a temperaturas de 500°C a 560°C. Para realizar este proceso las piezas o probetas deben ser sometidas a un tratamiento de temple, posteriormente un tratamiento de revenido a temperatura entre 500°C y 700°C, la cual debe ser superior a la temperatura de aplicación para el proceso de nitruración. [9]

Los aceros al carbono no se los debe nitrurar, ya que la capa nitrurada resulta muy frágil, por esta razón los aceros para nitruración tienen un contenido de carbono de (0,25-0,40) %. Entre las ventajas que presenta el proceso de nitruración en una pieza de acero se tiene la generación de una capa superficial muy elevada con respecto a la dureza, esta capa es más grande que la que se puede lograr mediante el proceso de cementación. Las piezas nitruradas pueden trabajar a altas temperaturas, pero siempre inferiores a las utilizadas en el proceso. Adicional, cabe mencionar que la nitruración es un proceso en el que la pieza no sufre deformaciones. [9]

2.6.2.1. Nitruración Gaseosa

La nitruración gaseosa consiste en la reacción de disociación del amoníaco en nitrógeno e hidrógeno, que se produce a una temperatura de 480°C. En este proceso las probetas se introducen en un horno eléctrico que es cerrado herméticamente, posteriormente se calienta la pieza hasta los 500°C, mientras se la expone a un flujo de nitrógeno. Una vez alcanzada esa temperatura el nitrógeno es substituido por el amoníaco, con un caudal apropiado se consigue una disociación del 30%. El tiempo del tratamiento varía entre las 12 y 72 horas, de esta forma se obtiene capas desde 0,15mm a 0,6mm. Una vez finalizado el tratamiento se dejan enfriar las probetas con nitrógeno dentro del horno hasta una temperatura cercana a los 100°C. [27]

2.6.2.2. Nitruración líquida

La nitruración líquida es un procedimiento que se realiza sumergiendo las piezas en un baño de sales fundidas, éste baño contiene cianuros y cianatos. El procedimiento se realiza a temperaturas que oscilan entre los 565°C y los 575°C, con tiempos de permanencia que varían entre los 10 minutos y 4 horas. El porcentaje de nitrógeno absorbido por la pieza en la nitruración líquida es mucho más elevado que en el proceso de nitruración gaseosa. [27]

2.6.2.3. Nitruración iónica

La ionitruración es el procedimiento más moderno que se ha desarrollado para realizar una nitruración. El nitrógeno proviene del plasma de una descarga luminiscente. Después de obtener un vacío elevado en un reactor, se introducen hidrocarburos gaseosos a una presión que oscila entre los 0,1 y los 10 Torr. Se aplica

una diferencia de potencial entre las paredes del reactor, que actúan como ánodo y las piezas que actúan como cátodo. [27]

2.7. Hornos

El horno es el principal elemento para la realización de los tratamientos térmicos. Es un instrumento que está constituido por una caja susceptible de calentamiento, que permite el control y la regulación del tiempo, de la temperatura de la atmósfera y de las velocidades de calentamiento y de enfriamiento. [28]

2.7.1. Tipos de horno

Los diferentes hornos encontrados pueden ser divididos en varios tipos que dependen del criterio de clasificación que se escoja. Pueden ser clasificados según el procedimiento que se realiza para el calentamiento, por la atmósfera o por la solera del horno. Se puede realizar una división esquemática como se ve en la Figura 17.

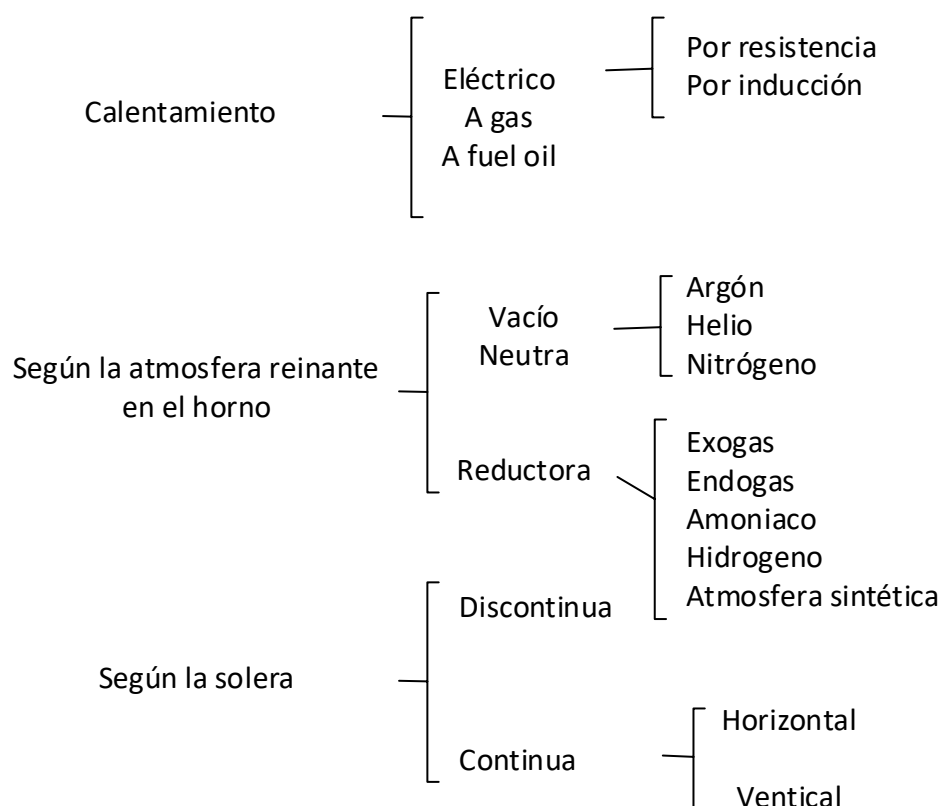


Figura 17. Tipos de Horno [28]

2.7.2. Hornos según el sistema de calentamiento

En este tipo de hornos el sistema de calentamiento que es acoplado al horno depende de la temperatura a conseguir y además es función de la naturaleza del material a tratar térmicamente. [28]

El calentamiento mediante la utilización de gas tiene como ventaja su costo económico y como inconveniente la dificultad del control de la temperatura, la temperatura alcanzada por el horno puede llegar a 1100°C, otro problema con la utilización de este método es control de la atmósfera que es complicado por esta razón apenas se utiliza este sistema de calentamiento en tratamientos térmicos. [28]

El método más usado para el calentamiento de hornos de tratamiento térmico es el sistema de resistencia eléctrica. Dependiendo de la distribución de las resistencias se tiene los diferentes nombres dados a los hornos, de tipo mufla o caja. Los hornos tipo caja tienen las resistencias instaladas a lo largo de las paredes internas del horno por lo que las resistencias están en contacto con el aire del interior del horno. [28]

El material de las resistencias eléctricas es conocido como nicrom que está constituido por un 70% níquel y 30% cromo, que son capaces de alcanzar una temperatura del 1100°C, y además son construidas de una aleación de carburo de silicio, que alcanza temperaturas un poco superiores a los 1300°C. Las resistencias de carburo de silicio tienen la ventaja de presentar una buena resistencia a los gases de la atmósfera y a la termo fluencia, pero poseen la ventaja de estar dotados de una buena velocidad de calentamiento. [28]

Para llegar a mayores temperaturas se emplean las resistencias de molibdeno, de tungsteno y de grafito que soportan 1800°C, 2500°C y 2700°C respectivamente. Para temperaturas incluso superiores, se usan los hornos de inducción que llega a los 3000°C. [28]

2.7.3. Hornos según la atmósfera

En los tratamientos térmicos se conoce como atmósfera la masa gaseosa que se encuentra encerrada dentro del horno y que se encuentra en contacto con las piezas a

tratar. La atmósfera puede ser de tres tipos con un carácter neutro, oxidante o reductor. [28]

El papel desempeñado por la atmósfera controlada es muy importante, por un lado, evita que se produzcan reacciones perjudiciales, como son la oxidación y la descarburación de las probetas que están sometidas al tratamiento, y por otro lado permite realizar las reacciones deseadas, como la reducción de óxidos superficiales y la eliminación de gases adsorbidos. [28]

CAPÍTULO 3

DESAROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Validación del material

Para validar las propiedades químicas y mecánicas del material AISI 5151 comercializado como E410, se procede a someter a ensayos de espectrometría y dureza, estos ensayos son detallados a continuación:

3.1.1. Ensayo espectrofotométrico

Mediante el uso de la máquina FOUNDRY-MASTER XPERT mostrada en la Figura 18, que se encuentra en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, el cual permitió realizar el ensayo de identificación de los elementos químicos que constituyen el material AISI 5115.



Figura 18. Maquina FOUNDRY-MASTER XPERT
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.1.1.1. Procedimiento del ensayo espectrofotométrico

- Preparar la probeta, donde la superficie debe estar limpia, libre de partículas y bien pulida a fin de no obtener errores en la lectura de los elementos químicos.
- Antes de cada medición se debe limpiar el electrodo con un cepillo metálico para eliminar impurezas que pudieran afectar la lectura de los elementos químicos del material.
- Posteriormente posicionar la probeta en el porta muestras del equipo.
- Colocar la probeta cerca del electrodo para que se pueda efectuar la quema del material y posteriormente obtener el porcentaje de elementos analizados.
- Revisar y comparar el porcentaje de elementos analizados con el certificado del material emitido por el proveedor.

3.1.2. Ensayo de dureza Rockwell

Para obtener los valores de dureza Rockwell se empleó la escala C bajo el procedimiento basado en la norma NTE INEN-ISO 6508-1 y el manual de uso propio de la máquina que se observa en la Figura 19.



Figura 19. Durómetro PHASE II

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.1.2.1. Procedimiento del ensayo de dureza

Para el ensayo de dureza se siguió el procedimiento indicado en la norma NTE INEN-ISO 6508-1 [29], donde establece que el ensayo se realice a una temperatura ambiente dentro de los límites de 10°C a 35°C por el motivo que puede influir en el resultado.

- La distancia que se tiene del centro de una huella a un borde de la probeta a ser ensayada debe ser por lo menos dos veces y medio el diámetro de la huella, y en ningún caso menor de 1mm.
- A lo largo del ensayo se debe proteger el aparato contra sacudidas o vibraciones.
- La probeta se debe colocar sobre un soporte rígido y deben ser sustentadas de manera en que la superficie sobre la que se pretende realizar la huella esté posicionada en un plano normal al eje del indentador y además a la línea fuerza de la indentación, y por consiguiente se evite el movimiento de la probeta.
- Colocar el indentador en contacto directo con la superficie a ser ensayada y aplicar la fuerza preliminar de ensayo F_0 durante 5 segundos sin realizar sacudidas, vibraciones u otro tipo de oscilaciones. Donde F_0 toma un valor 0kgf
- Se debe incrementar la fuerza desde F_0 hasta F en un intervalo de 1 segundo a 8 segundos máximo. Donde F toma un valor 150kgf
- La fuerza total de ensayo denominada F debe ser mantenida durante un tiempo de 2 segundos a 5segundos. Posterior a esto se quita la fuerza y después de un corto periodo de tiempo de estabilización, pero manteniendo la fuerza preliminar de ensayo F_0 , se debe obtener la lectura final.
- La distancia entre los centros de dos huellas contiguas debe ser por lo menos de cuatro veces el diámetro de la huella, en ningún caso menor de 2mm.

3.1.3. Ensayo de dureza Vickers

En el ensayo de dureza se siguió el procedimiento indicado en la ASTM E384-17. [30]

- Previamente se debe maquinar las superficies hasta dejarlas paralelas.
- Determinar el indentador deseado.
- Se procede a limpiar el indentador con un hisopo de algodón y alcohol. No tocar la punta del penetrador con los dedos.
- Colocar la probeta en el durómetro, considerando que la superficie de la muestra sea perpendicular al eje del indentador.
- Seleccionar el área deseada para la determinación de la dureza.
- Ajustar el probador de modo que el indentador esté en el lugar adecuado para la aplicación de fuerza.
- Activar el probador para que el indentador se baje automáticamente y haga contacto con la muestra durante el período de tiempo establecido por el durómetro.
- Luego, eliminar la fuerza de forma manual.
- Después de eliminar la fuerza, cambiar el modo de medición y seleccionar el lente objetivo adecuado.
- Enfocar la imagen, ajustar la intensidad de la luz si es necesario y ajustar las aberturas para obtener la máxima resolución y contraste.
- Examinar la muesca para determinar su posición con respecto a la ubicación deseada y su simetría.
- Tomar lectura del valor de dureza, el cual se muestra en la pantalla del equipo.

3.1.4. Ensayo de metalografía

Para el ensayo metalográfico se siguió el procedimiento indicado en ASTM E1-11. [31]

- Pulir las probetas comenzando por la lija más gruesa, la muestra debe moverse hacia adelante y hacia atrás a través de la lija para obtener un desgaste uniforme. Entre cada paso debe girarse la muestra entre 45° y 90°.
- Este proceso debe repetirse hasta llegar a la lija más fina.
- Al final del pulido debe garantizarse que las superficies sean planas con un juego de rayones de esmerilado unidireccional. Para el pulido manual, sostener la muestra con la mano contra la pulidora cargada con abrasivo y mover la muestra en una trayectoria lineal. La fuerza y la velocidad aplicada

en el movimiento de la muestra durante el pulido es una cuestión de preferencia y experiencia personal.

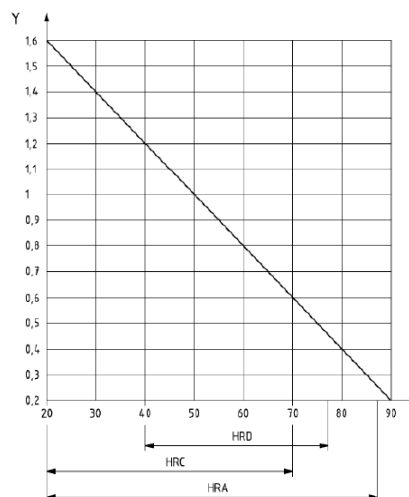
- Llevar al microscopio para observar el grano y espesor de dureza

3.2. Diseño y fabricación de la probeta

Para el dimensionamiento de las probetas se consideró los criterios establecidos según norma NTE INEN-ISO 6508-1 [29] que detalla el procedimiento del ensayo para la determinación de la dureza Rockwell superficial para materiales metálicos. Las probetas para los tratamientos térmicos de cementado y nitrurado pueden ser de cualquier tipo de medida, por lo que se tomó como patrón lo indicado en la norma con el fin de favorecer el ensayo experimental.

3.2.1. Dimensión de la probeta

Según las normas NTE INEN-ISO 6508-1 y ASTM E384-17 el espesor de la probeta debe ser de al menos 10 veces la profundidad remanente de la huella para indentadores cónicos y de 15 veces para indentadores esféricos. Las medidas se seleccionan tomando en cuenta factores como el diámetro disponible del proveedor. En la Figura 20 se muestra el cambio del espesor mínimo de la probeta en función de la huella del indentador.



Donde:
X: Dureza Rockwell
Y: Espesor mínimo de la probeta, en mm

Figura 20. Ensayo con indentador cónico de punta de diamante (escalas A, C y D) [10]

Donde:

HRC: Dureza Rockwell, escala C 150kgf

HRA: Dureza Rockwell, escala A 60kgf

HRD: Dureza Rockwell, escala D, 100kgf

Bajo estas consideraciones se tiene como resultado una probeta de forma cilíndrica tal como se muestra en la Figura 21. En el Anexo II se detalla el plano con las dimensiones de la probeta.

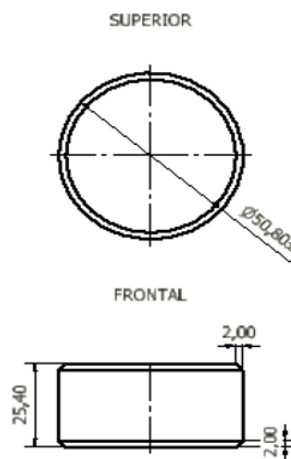


Figura 21. Dimensiones de la probeta

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Para su fabricación se procede a la obtención del material AISI 5115 el cual es un acero aleado, con el mecanizado realizar un cilindrado y un refrentado para dejar las probetas en las dimensiones previamente definidas. En la Figura 22 se muestra el proceso de mecanizado.

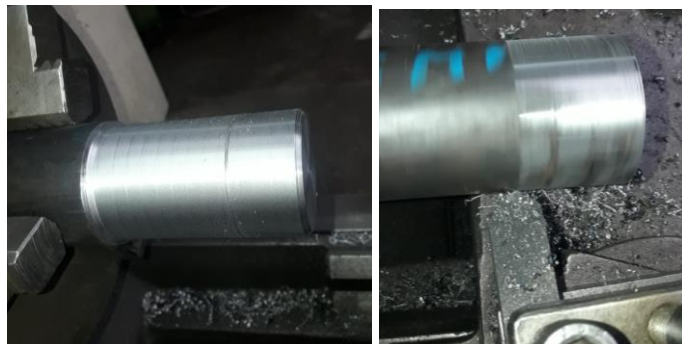


Figura 22. Mecanizado de las probetas

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.2.2. Especificaciones de la probeta

La probeta para el ensayo debe tener una superficie lisa y uniforme, libre de escamas de óxido, materias extrañas y completamente libres de lubricantes, a menos que se especifique lo contrario en las normas de producto o de materiales. Se hace una excepción con los metales reactivos como el titanio que pueden pegarse al indentador, en estos casos se puede utilizar un lubricante adecuado como el queroseno. El uso de un lubricante debe registrarse en el informe de ensayo.

3.2.3. Preparación de la probeta

La preparación debe ser realizada de tal manera que se reduzca al mínimo la alteración de la dureza superficial ocasionadas por el calentamiento. Estas consideraciones se deben tener en cuenta principalmente en el caso de huellas de poca profundidad.

Se procede a mecanizar el material AISI 5115 en el torno realizando un cilindrado y un mecanizado de refrentado. Para dejar las caras de la probeta con una superficie lisa, se utiliza las lijas con las siguientes numeraciones: 150, 600, 1000, 1200 y 1500 en el respectivo orden nombrado, como se puede visualizar en la Figura 23.



Figura 23. Desbaste de probetas

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.3. Características de los tratamientos térmicos para endurecimiento superficial.

3.3.1. Procedimiento de cementado

Para el proceso de cementación sólida se utilizan hornos que son calentados en base a carbón, gas, fuel-oil y electricidad. Suelen ser usados recipientes de fundición, de chapa de acero soldado, de acero moldeado, de chapa embutida y de acero moldeado inoxidable. Sin importar el material de las cajas, las realizadas en acero moldeado inoxidable son las que presentan las mejores características, ya que no se oxidan y son de gran duración.

Es importante que estas cajas estén construidas con patas o queden colocadas sobre apoyos con el fin de que el calor penetre por debajo y que la cara inferior se pueda calentar con facilidad. La operación se realiza generalmente a temperaturas comprendidas entre 850°C y 1000°C, siendo las temperaturas próximas a 900°C las más utilizadas.

Se pueden emplear cementantes sólidos, líquidos y gaseosos, oscilando la duración de la cementación de 6 a 10 horas cuando se utilizan cementantes sólidos, de 1 a 6 horas cuando se trata de sales o cementantes líquidos y de 1 hora a varios días utilizando cementantes gaseosos.

Para el proceso, primero se debe triturar el carbón, alcanzando partículas muy pequeñas para después ser colocado en las cajas, junto con las probetas a cementar. Posteriormente se debe colocar las cajas de cementación, con las piezas y las mezclas cementantes en el interior del horno, cerrando bien las juntas, con barro o arcillas refractarias. Para esto el horno se debe precalentar a una temperatura comprendida entre 850°C y 1000°C. Dejar actuar las piezas durante el tiempo requerido. Finalmente se debe realizar un baño de aceite una vez completado el tiempo de cementado (Temple).

3.3.1.1. *Diseño del tratamiento térmico superficial de cementación*

Uno de los principales elementos para obtener una buena cementación en el acero es el porcentaje del contenido de carbono, el material AISI 5115 el cual fue seleccionado tiene un porcentaje de carbono de 0,17%.

El tipo de cementación seleccionada es la cementación solida o también denominada por caja. El material cementante tiene un nombre comercial denominado carbón druferrit posee una mejor absorción frente a los otros métodos. Desde el punto de vista técnico esta cementación puede ser usada en una gran cantidad de hornos y es mejor en lotes pequeños de piezas como se tiene en este proyecto.

3.3.1.2. *Tratamiento térmico superficial de cementación*

- La probeta de material AISI 5115 debe estar libre de cualquier tipo de impurezas que impidan una buena difusión del material cementante.
- Iniciar los parámetros establecidos del horno para el tratamiento térmico.
- Colocar 2cm de carbono druferrit en la caja fundida. La medida de la caja fundida se puede observar el proceso en la Figura 24.

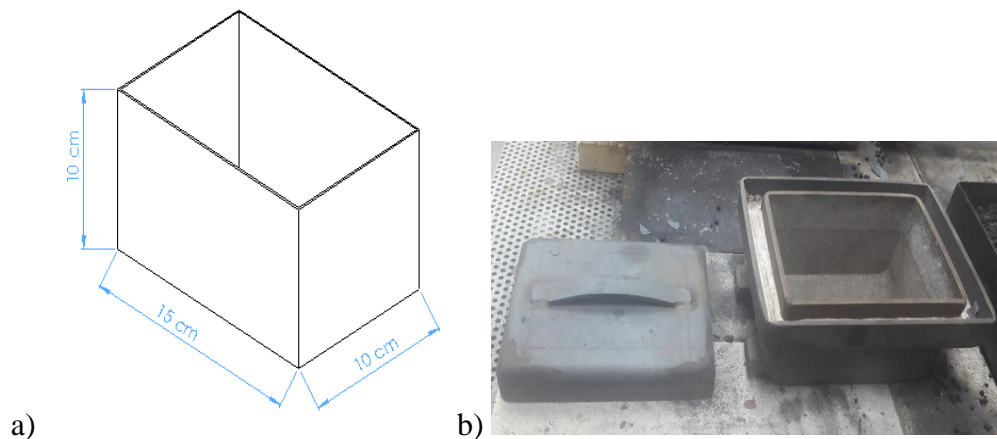


Figura 24. Caja de hierro fundida a) Dimensiones, b) Forma física

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Insertar la pieza, de forma en que esta quede en el centro del recipiente.
- Llenar completamente el recipiente. La caja debe ser sellada con arcilla en los bordes para poder tener una mejor hermetización.

- Una vez precalentado el horno a una temperatura de 150°C, introducir la pieza en el horno. Observar el proceso en la Figura 25.

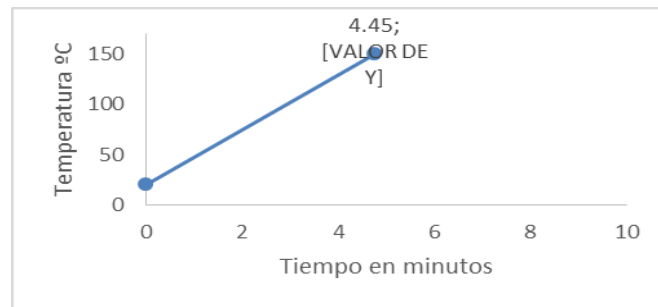


Figura 25. Precalentamiento del horno.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Esperar hasta que la probeta alcance los 930°C. Observar el proceso en la Figura 26.

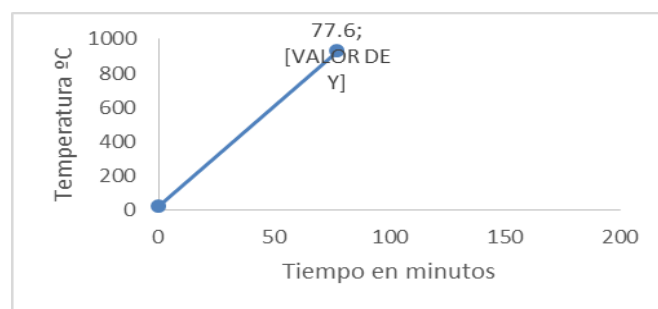


Figura 26. Calentamiento de la probeta

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Se procede a dejar las probetas un tiempo de permanencia de 1, 2, 3 y 4 horas respectivamente. Observar el proceso en la Figura 27.

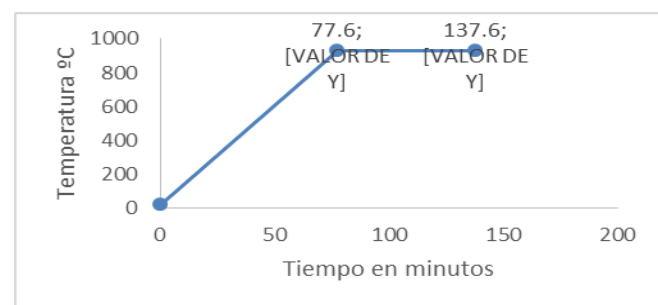


Figura 27. Permanencia de la probeta 1 hora.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Una vez cumplido el tiempo de permanencia se procede a realizar el temple en aceite. Se observa el proceso en la Figura 28.

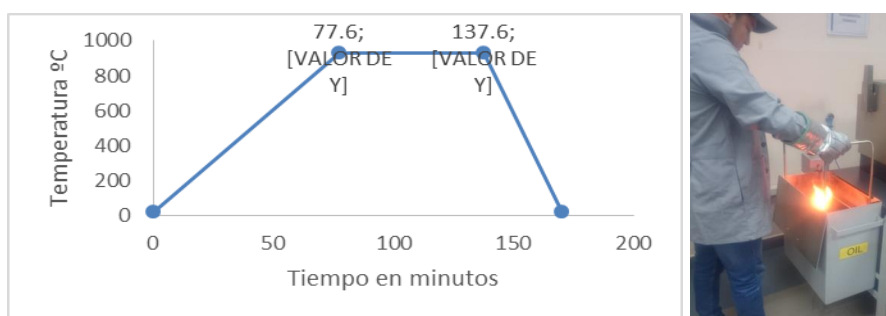


Figura 28. Enfriamiento de la probeta en aceite.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.3.1.3. Tratamiento térmico de revenido

- Iniciar los parámetros establecidos del horno para el tratamiento térmico.
- Precalentar el horno a 30°C. Observar el proceso en la Figura 29.

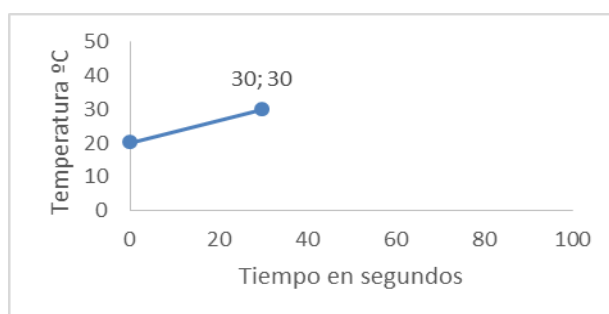


Figura 29. Precalentamiento del horno.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Introducir la probeta al horno para que alcance una temperatura de 200°C. Observar el proceso en la Figura 30.

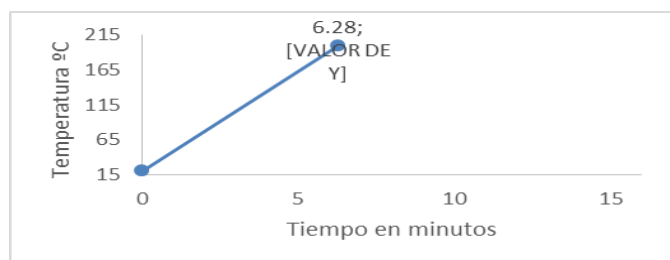


Figura 30. Calentamiento de la probeta

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Mantener las probetas en el horno durante dos horas. Observar el proceso en la Figura 31.

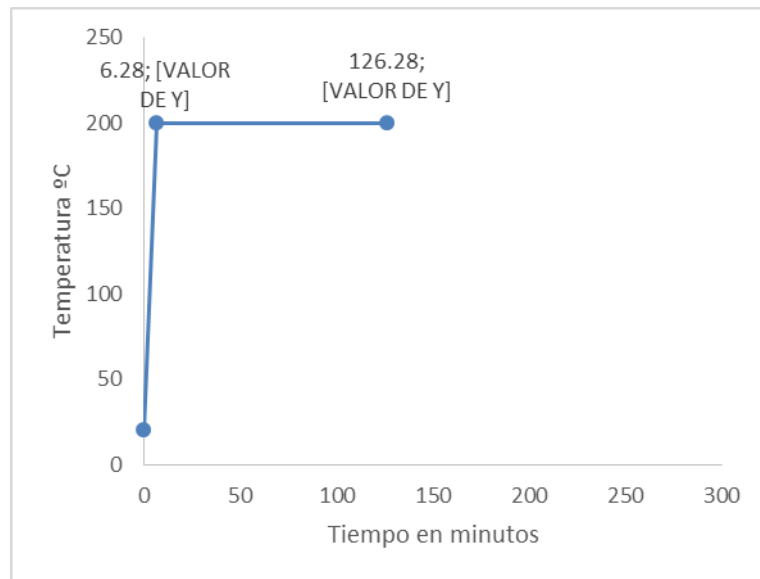


Figura 31. Permanencia de la probeta 2 horas

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Extraer la probeta y dejar enfriar a temperatura ambiente. Observar el proceso en la Figura 32.

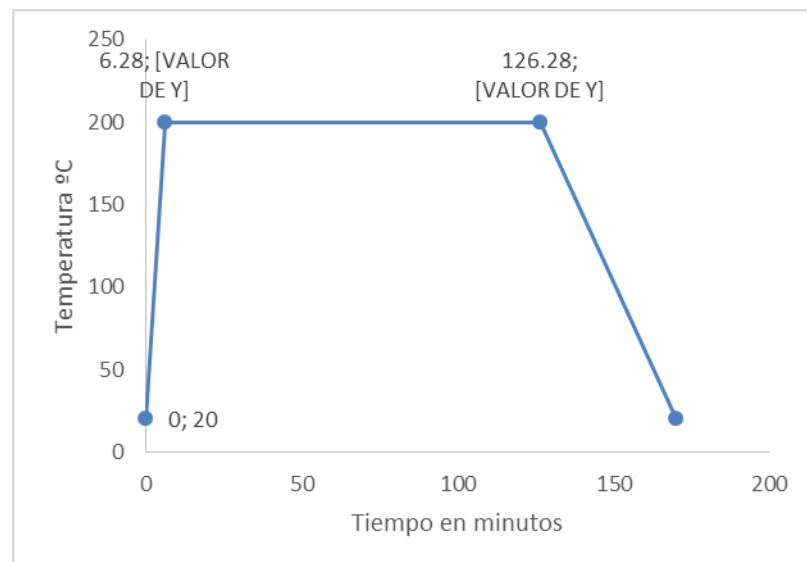


Figura 32. Enfriamiento de la probeta en aceite

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Los parámetros con los que se realizaron los tratamientos en las probetas se describen en la siguiente Tabla 5. En la Figura 32 se puede observar el ciclo térmico del tratamiento termoquímico de cementado de forma general.

Tabla 5. Especificaciones generales del tratamiento térmico superficial de cementado

Tratamiento	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Probetas	Temperatura Aceite (°C)
Cementación	930	60	1	10
	930	120	2	
	930	180	3	
	930	240	4	
Temple	800	60	1,2,3,4	
Revenido	200	120		--

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

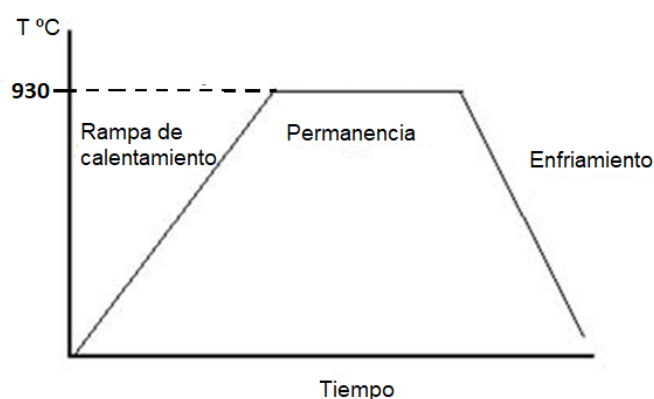


Figura 33. Ciclo térmico mostrando del tratamiento superficial de cementando en el acero AISI 5115

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

3.3.2. Diseño del tratamiento térmico superficial de nitrurado

Para el proceso de nitrurado aplicado al material AISI 5115, este fue realizado en la empresa Bohler, la cual maneja el proceso patentado llamado TENIFER, que consiste en una variante del proceso de nitruración líquida, este proceso se lleva a cabo a temperaturas entre 480°C a 620°C, pero se maneja una temperatura estándar de 550°C. Se utiliza sal fundida compuesta por cianato y carbonato en el cual el

agente activo es el cianato, que al reaccionar con la superficie del acero se forma carbonato y al regenerar el baño el carbonato se reduce nuevamente en cianato.

Antes de realizar el tratamiento de nitrurado, el material debe ser templado y revenido a temperaturas superiores a la empleada dentro del proceso de nitrurado, para usos específicos en piezas a ser utilizadas en cualquier campo, el material debe estar en sus dimensiones finales debido a que no es posible realizar operaciones de mecanizado posteriores al proceso de nitrurado en el material, ya que se puede alterar y reducir la capa de compuestos formados [32].

3.3.2.1. Tratamiento térmico superficial de nitrurado

Según Villar [33] y Muiño [32] el proceso para este ensayo es el siguiente:

- Realizar el desengrasamiento de la pieza.
- Introducir la pieza en el horno para su precalentamiento.
- Precalentar las piezas a una temperatura de 420°C
- Una vez precalentado proceder con la nitrocarburation en baño de sales a una temperatura entre 570°C y 580°C en un tiempo entre una y dos horas.
- Enfriar las piezas inmediatamente a 420°C en el baño de sales y dejar un tiempo de oxidación.
- Extraer del baño de sales, dejar enfriar a temperatura ambiente y limpiar con agua.

En la Figura 34 se observa el proceso conocido comercialmente como Tenifer.

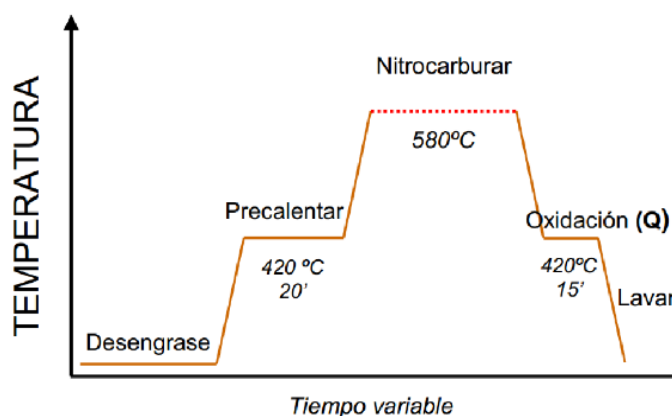


Figura 34. Etapas de tratamiento Tenifer [33]

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Identificación del Material

4.1.1. Ensayo de Espectrometría

Mediante los datos obtenidos se comparó los elementos químicos del material, lo cual dio un resultado favorable puesto que se encuentran dentro de los parámetros para ser considerado como AISI 5115, esto se puede observar en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Medición de los elementos químicos de las probetas

% Elementos Químicos de las Probetas									
Elementos Químicos	Probetas Material AISI 5115 (%)								Valor promedio
	1	2	3	4	5	6	7	8	
C	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.17	0.17	0.16	0.17
Si	0.25	0.24	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.26	0.25
Mn	1.3	1.3	1.29	1.3	1.3	1.3	1.31	1.32	1.31
Cr	1	0.95	0.96	1.1	0.96	1.07	1.07	1.07	1.02

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Tabla 7. Comparación de elementos obtenidos con datos según proveedor

Elementos Químicos					
Elementos Químicos	Especificaciones del proveedor (%)		Especificaciones obtenidas mediante el ensayo de espectrofotometría (%)		
C		0.17		0.17	
Si		0.24		0.25	
Mn		1.08		1.31	
Cr		0.89		1.02	

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Los resultados del ensayo de espectrofotometría y especificaciones del material suministrado por el fabricante se muestran en el Anexo III y Anexo IV respectivamente.

4.1.1.1. Análisis del ensayo de espectrometría

Se observa que los valores medios de carbono y silicio en las probetas están dentro de los parámetros para el acero AISI 5115, mientras que los valores de manganeso y cromo son mayores que en las especificaciones del proveedor.

4.1.2. Ensayo de dureza Rockwell

Para la realización del ensayo se emplea el durómetro perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana, que facilitó realizar el ensayo de dureza Rockwell y mediante el cual se obtiene los siguientes valores de dureza. En la Tabla 8 se muestra los resultados.

Tabla 8. Valores Obtenidos del Ensayo de Dureza Rockwell

Ensayo de Dureza (HRC)								
Número de mediciones	Probe ta 1	Probe ta 2	Probe ta 3	Probe ta 4	Probe ta 5	Probe ta 6	Probe ta 7	Probe ta 8
1	3.4	4.3	4.4	4.3	6.1	4.6	5.2	4
2	4.1	4.1	3.9	4.7	4.5	3.9	4.7	4.8
3	3.8	4.6	4.5	5	5.4	4.6	4.5	4.1
4	4.1	4.5	3.5	4.7	4.5	5.2	4.6	4.5
5	4	4.2	4	4.8	4.2	4.6	4.8	3.7
6	4.4	4.2	3.7	5.5	3.9	5	4.6	4.5
7	3.6	5.8	4.8	5.6	4.3	4.6	5.5	3.9
8	3.5	5.2	3.6	6.2	4.4	4.4	5	4.2
Valor promedio	3.86	4.61	4.05	5.1	4.66	4.61	4.86	4.2

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Los valores obtenidos en la Tabla 8 se encuentran a detalle en el Anexo V, en la Figura 35 se observa el resultado para la probeta 1 y primera medición.



Figura 35. Medidas de la dureza en el material AISI 5115, probeta 1, primer resultado
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.1.2.1. Análisis del Ensayo de Dureza Rockwell

Para el material AISI 5115, se obtuvo una dureza promedio de 4.5HRC, según las especificaciones del proveedor, este valor de dureza correspondiente al material AISI 5115 varía entre 5HRC y 15HRC, se observa que las propiedades descritas por el fabricante son superiores a las obtenidas experimentalmente.

4.2. Análisis para probetas cementadas

4.2.1. Análisis de dureza para probetas del material AISI 5115 cementadas

De igual manera que en el ensayo anterior se obtiene los valores de dureza Rockwell para las diferentes probetas sometidas a tratamiento de cementado, en la Tabla 9 se

observa cómo cambia la dureza al variar el número de horas del tratamiento térmico superficial. En el Anexo VI se muestra la información completa del ensayo.

Tabla 9. Valores de Dureza del Ensayo Rockwell en Probetas Cementadas

Número de indentaciones	Ensayo de Dureza (HRC)			
	Horas de cementado			
	1	2	3	4
1	47,9	55,2	60,9	61,3
2	53,9	54,8	61	62,6
3	54,9	54,9	61	62,3
4	55	55,3	61	61,8
5	55	54,7	61,2	62,1
6	55,1	54,7	61,4	62,5
7	55,1	54,4	61	61,9
8	55,1	53,4	60,7	61,6
Valor promedio	54	54,675	61,025	62,0125

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

A continuación, en la Figura 36 se presenta la curva de tendencia y la dispersión de los datos obtenidos de dureza.

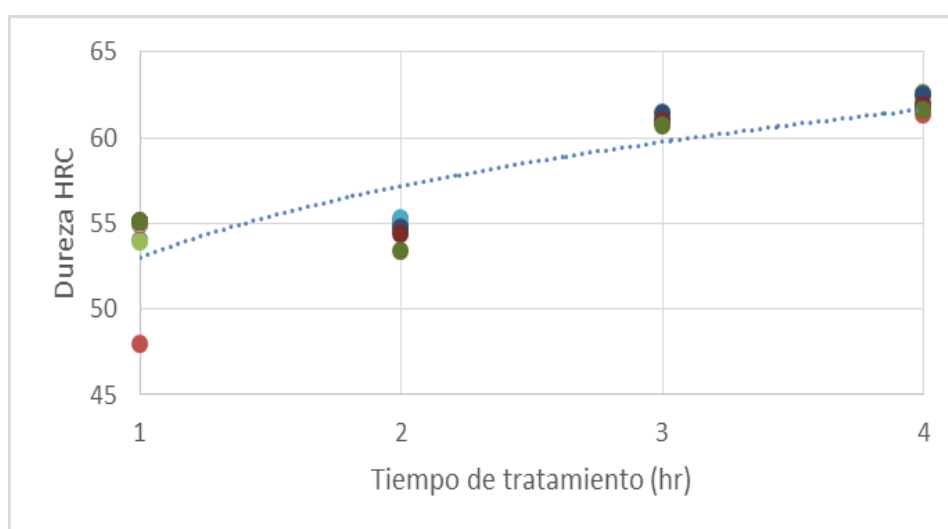


Figura 36. Curva de tendencia dureza vs horas de tratamiento de cementado.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En base a los resultados obtenidos se observa que el tratamiento tras una hora y dos horas, las probetas alcanzaron una dureza promedio de 54HRC, al realizar un tratamiento por tres horas se tiene un aumento hasta 61HRC y para cuatro horas se tiene una ligera mejora hasta llegar a 62HRC, de la curva de tendencia se observa que la misma tiene una tendencia asintótica.

4.2.2. Ensayo metalográfico de probetas cementadas

Se procede a realizar un ensayo de metalografía el cual permite observar la microestructura y el espesor de la capa de dureza de cada una de las probetas tratadas térmicamente por cementación.

4.2.2.1. Análisis del espesor de capa de dureza en probetas cementadas

En la Tabla 10 se muestra los espesores de capas alcanzados luego del tratamiento térmico superficial de cementado. La profundidad de capa cementada se mide desde la superficie hacia el centro de la probeta. Los datos completos del informe se encuentran en el Anexo VII

Tabla 10. Espesor de capa de dureza en probetas cementadas (mm)

Mediciones	Tiempo de cementado (horas)			
	1	2	3	4
1	0,42	0,50	0,65	0,88
2	0,34	0,53	0,65	0,85
3	0,37	0,54	0,64	0,90
Valor promedio	0,38	0,52	0,65	0,88

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 37, se presenta la curva de tendencia del espesor de la capa de cementado y como cambia al variar el tiempo del tratamiento. Se observa un aumento en el espesor de la capa lineal con respecto al tiempo del tratamiento, después de las tres horas de tratamiento se observa que el espesor incrementa a 0.65mm.

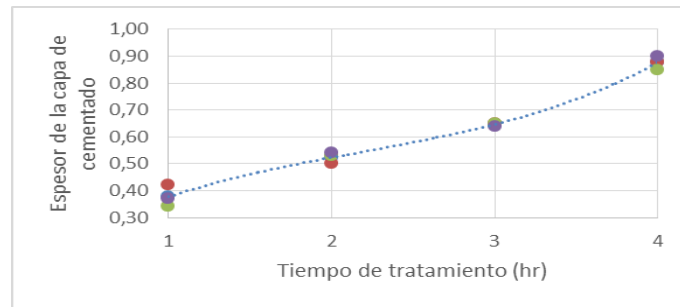


Figura 37. Curva de tendencia espesor vs horas de tratamiento de cemento.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.2.2.2. *Análisis de la microestructura de probetas cementadas*

Bajo una magnificación de 50X se observa que las probetas cementadas cuentan con un espesor de capa de aproximadamente 0,38mm, 0,52mm, 0,65mm y 0,87mm para los tiempos de exposición de 1, 2, 3 y 4 horas respectivamente. En la Figura 38 se observa las mediciones del espesor de capa en las probetas tratadas térmicamente.

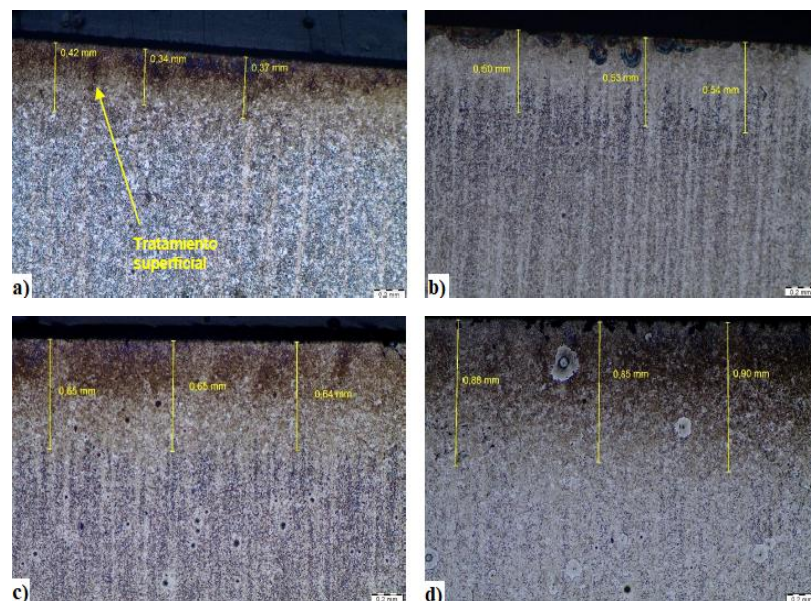


Figura 38. a) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 1 hora, b) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 2 horas, c) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 3 horas, d) Capa de espesor aproximado en tiempo de exposición de 4 horas.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 39 se puede observar bajo una magnificación de 100X, que la microestructura es no homogénea y corresponde a una martensita revenida, este tipo de estructura ofrece al material mayor tenacidad en el material y buena resistencia a la fatiga.

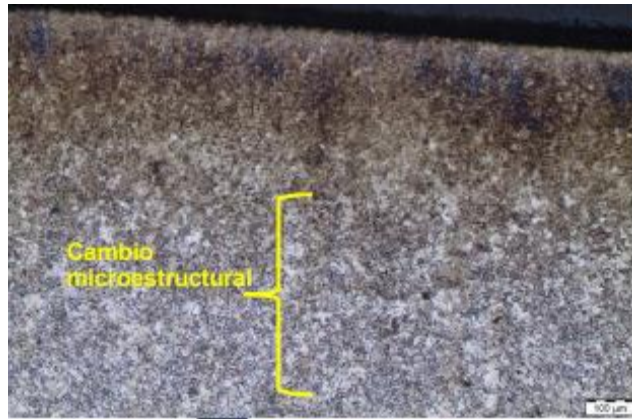


Figura 39. Martensita revenida

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 40, se presenta la microestructura del material bajo una magnificación de 500X donde se observa la estructura obtenida después del cementado es una matriz de ferrita acicular, la cual aumenta la tenacidad en el material.

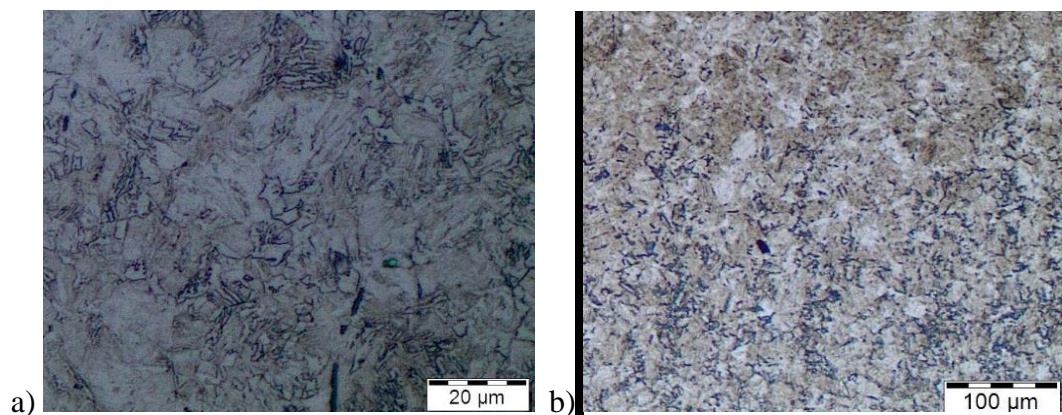


Figura 40. a) Microestructura con escala de 20 µm b) microestructura con escala de 100 µm.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.3. Análisis para probetas nitruradas

4.3.1. Análisis de dureza para probetas del material AISI 5115 nitruradas

Para la medición de dureza en las probetas se consideró los criterios de la norma ASTM 384, para lo cual se realizó un mapeo de durezas desde el borde de la probeta hacia el núcleo en sentido transversal. En la Figura 41 se muestra el número de indentaciones.

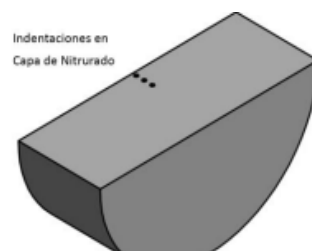


Figura 41. Bosquejo de la probeta para ensayo de dureza Vickers

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

De igual forma que para las probetas cementadas se procede a realizar los ensayos de dureza para las probetas con tratamiento de nitrurado, para los tiempos de 1 y 2 horas se realizó tres indentaciones, mientras que para los tratamientos con tiempo de 3 y 4 horas únicamente se tiene dos mediciones. Estos valores se los observa en la Tabla 11. Los datos completos del informe se encuentran en el Anexo VII.

Tabla 11. Datos Obtenidos del Ensayo de Dureza Vickers

Valores de micro dureza				
Tiempo de Tratamiento (hr)	Numero de indentaciones	Durezas Vickers (HV)		
1	1	324,39	312,35	368,52
	2	194,45	181,47	208,02
2	1	555,41	607,05	527,67
	2	568,23	509,02	525,74
3	1	609,88	660,32	xx
	2	413,57	661,91	xx
	3	255,92	495,98	xx
4	1	627,91	549,09	xx
	2	566,31	639,22	xx
	3	437,42	424,70	xx

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 42 y 43 se puede observar el número de indentaciones y los resultados obtenidos en la probeta nitrurada a exposición para 2 y 4 horas.

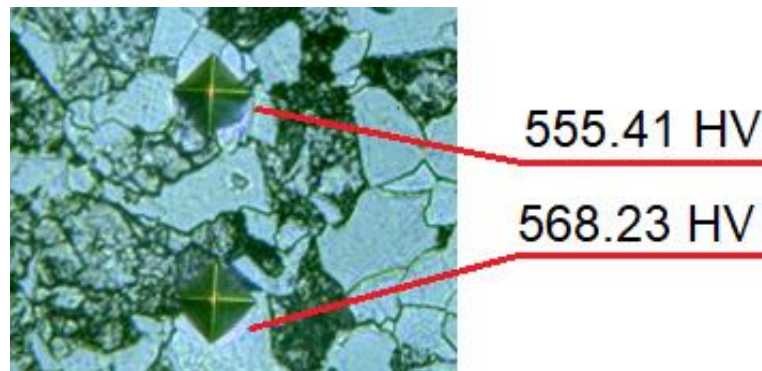


Figura 42. Medidas de indentaciones de probeta nitrurada a 2 horas
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

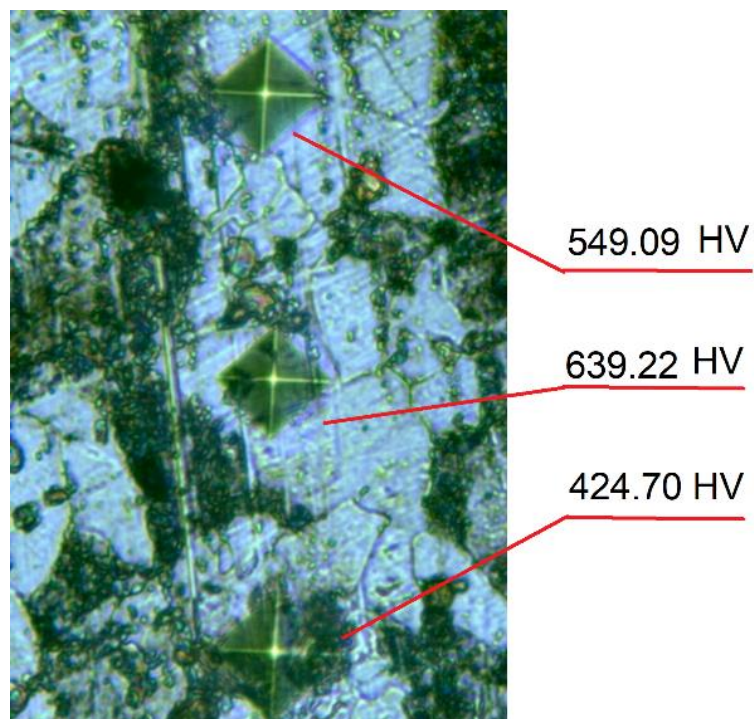


Figura 43. Medidas de indentaciones de probeta nitrurada a 4 horas
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

A continuación, en la Figura 44 se observa que el tratamiento térmico de nitrurado a un tiempo de permanencia de 1 hora la probeta alcanza un valor de dureza de 264,9HV, mientras que con el tiempo de permanencia de 2 horas alcanza 548,9HV, por lo tanto, se observa que el valor de dureza tiene mayor variabilidad de 1 a 2 horas

de permanencia. Mientras que para 2, 3 y 4 horas permanece prácticamente constante con un valor de 548,9HV.

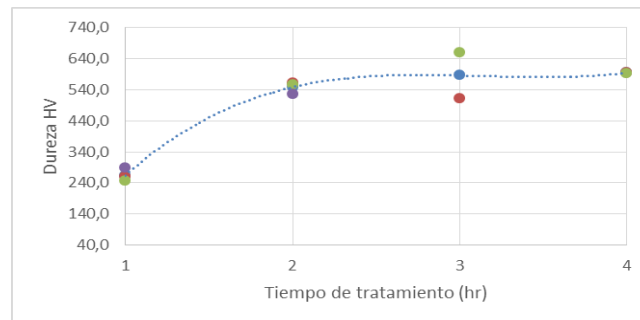


Figura 44. Curva de tendencia de Dureza vs horas de tratamiento de nitrurado.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.3.2. Ensayo metalográfico de probetas nitruradas

Se procede a realizar un ensayo de metalografía el cual permite observar la microestructura y el espesor de la capa de dureza de cada una de las probetas tratadas térmicamente por nitruración

4.3.2.1. Análisis de la microestructura de las probetas nitruradas

Bajo una magnificación de 100X se observa que las probetas nitruradas cuentan con un espesor de capa de aproximadamente 0,095mm y 0,46mm para los tiempos de exposición de 2 y 3 horas respectivamente, en el caso de las probetas expuestas a tiempo de 1 y 4 horas no se logró identificar el espesor de la capa superficial. En la Figura 45 se observa las mediciones del espesor de capa en las probetas tratadas térmicamente a 2 y 3 horas.

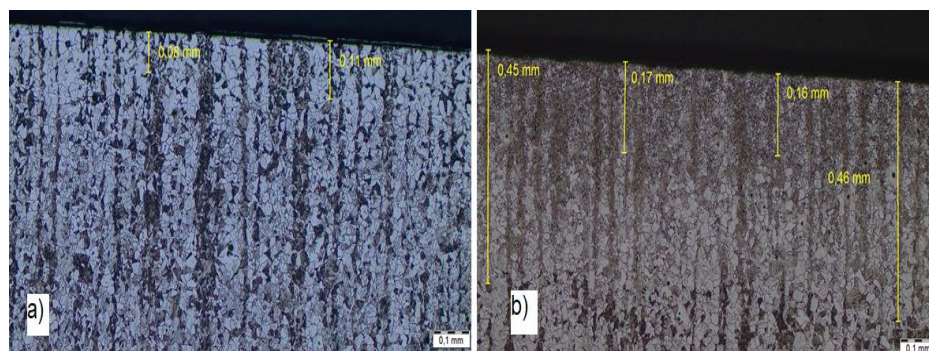


Figura 45. a) Capa de espesor aproximado en un tiempo de permanencia de 2 horas en el tratamiento térmico de nitrurado b) Capa de espesor aproximado en un tiempo de permanencia de 3 horas en el tratamiento térmico de nitrurado

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

La metalografía bajo una magnificación de 100X posee una microestructura no homogénea de tipo ferrítica perlítica, la cual ofrece propiedades mecánicas de endurecimiento, un alto nivel de resistencia de tracción y una gran resistencia al desgaste. En la Figura 46 se puede apreciar la estructura obtenida para la probeta cementada.

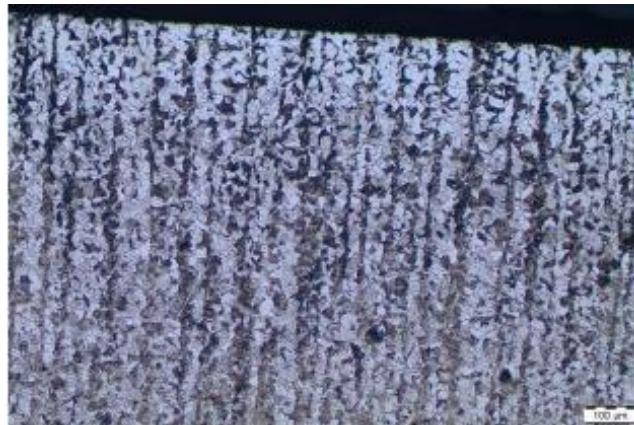


Figura 46. Ferrítica perlítica

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 47 se presenta la microestructura de material bajo una magnificación de 500X para observar la estructura obtenida, después del nitrurado se obtiene una matriz de ferrita con colonias de perlita. Donde las colonias de perlita tienen apariencia oscura mientras que el resto de la microestructura de color blanca es martensita formada desde la austenita no transformada cuando fue templada desde la temperatura de 930°C.

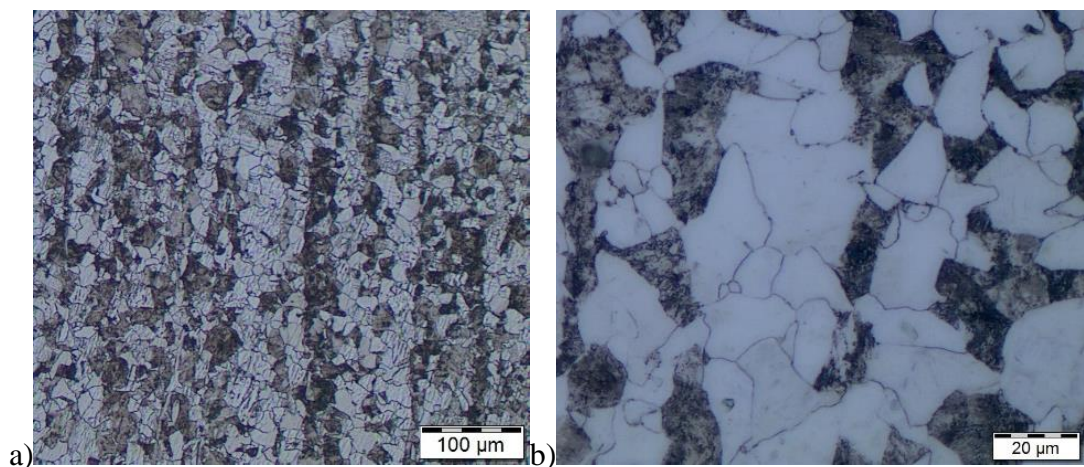


Figura 47. a) Microestructura con escala de 100 μm b) microestructura con escala de 20 μm.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En lo que respecta a la probeta nitrurada con tiempo de exposición de 4 horas se obtuvo un cambio total de su estructura el cual presenta una matriz de ferrita con colonias de perlita tal como se muestra en la Figura 48.

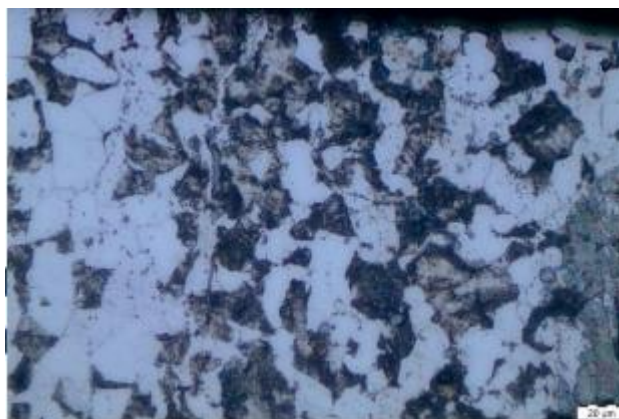


Figura 48. Probeta de exposición de 4 horas
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.3.2.2. Análisis del espesor de capa de dureza en las probetas nitruradas

Al realizar el tratamiento de nitrurado, con un tiempo de tratamiento de 1 hora de permanencia la capa es prácticamente imperceptible mientras que, en el tratamiento por 4 horas de permanencia, se observa que la nitruración ha llegado hasta el núcleo, en el caso de 2 y 3 horas de permanencia la nitruración se ha dado en la zona externa de la pieza. Estos resultados se aprecian en la Tabla 12. Los datos completos del informe se encuentran en el Anexo VI

Tabla 12. Datos obtenidos de espesor en tratamiento de nitrurado

Espesor de la capa de nitrurado [mm]				
Mediciones	Tiempo de cementado (horas)			
	1	2	3	4
1	0	0,08	0,45	
2	0	0,11	0,14	No pudo ser determinado
3	0		0,16	
4	0		0,46	
Valor promedio	0,0	0,1	0,25	No pudo ser determinado

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 49, se presenta la curva de tendencia del espesor de la capa de nitrurada y cómo cambia al variar el tiempo del tratamiento en los tiempos de exposición de 2 y 3 horas.

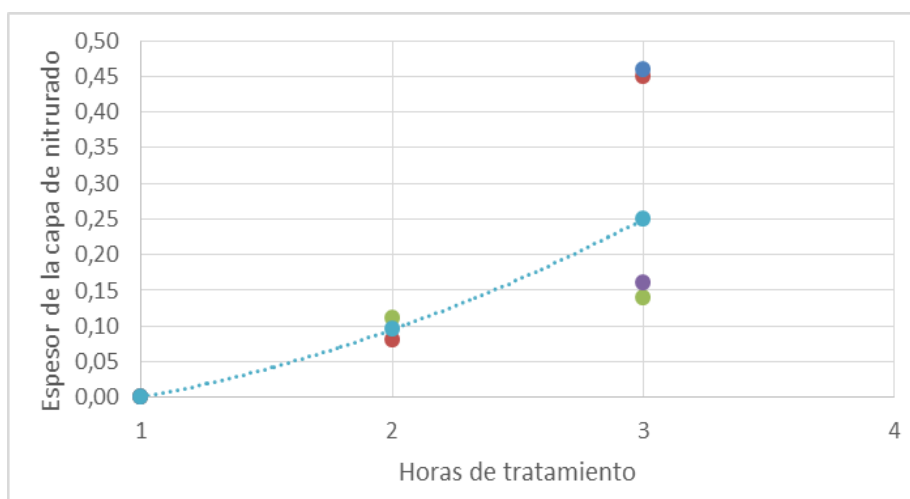


Figura 49. Curva de tendencia espesor vs horas de tratamiento de nitrurado.

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

4.4. Análisis comparativo de dureza

A continuación, en la Tabla 13 se observa el resumen de las durezas obtenidas en el tratamiento térmico de cementado y nitrurado, para esto se transforma los resultados de dureza Vickers a Dureza Rockwell C de las probetas mencionadas.

Tabla 13. Cuadro comparativo de dureza

Horas de tratamiento	Dureza cementado	Dureza nitrurado	
	HRC	HV	HRC
1	54,0	264,9	25
2	54,7	548,9	52
3	61,0	586,4	54
4	62,0	595,6	55

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

En la Figura 50 se puede observar la gráfica comparativa de dureza, para las probetas cementadas y nitruradas en función de los tiempos de permanencias.

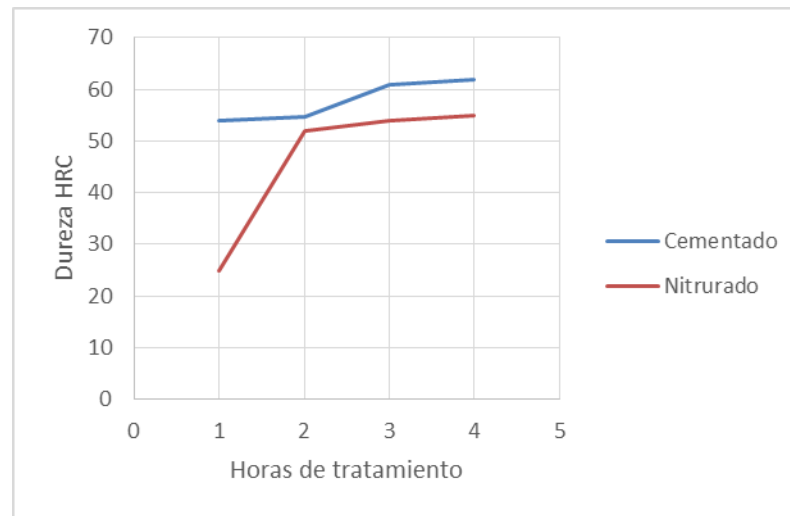


Figura 50. Grafica comparativa de dureza entre tratamientos

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

- Se evidencia que se obtienen altos valores de dureza en el material ensayado bajo tratamiento térmico superficial de cementación con un valor promedio de 58HRC comparado con el de nitruración que tiene un valor promedio de 47HRC.
- Basado en la estructura metalografía se tiene que para las probetas cementadas están constituidas por una microestructura martensita revenida lo cual le ofrece al material una gran tenacidad y buena resistencia a la fatiga. En lo que respecta a las probetas nitruradas presentan una microestructura ferrítica perlítica que ofrece un alto nivel de resistencia de tracción y una gran resistencia al desgaste.
- La capa de dureza obtenida para las probetas cementadas con un tiempo de permanencia de 2 horas y 3 horas corresponde a 0,52mm y 0,65mm respectivamente, mientras que para las probetas nitruradas con un tiempo de permanencia de 2 horas y 3 horas corresponde a 0,1mm y 0,25mm

CONCLUSIONES

- El acero AISI 5115 comercialmente utilizado en el sector industrial local es un material usado para la fabricación de piñones, rodillos, levas, estriados, esto según las encuestas realizadas.
- El acero AISI 5115 evaluado está constituido por 0.17% de C, 0.25% de Si, 1.31% de Mn, 1.02% de Cr, que al ser comparados con las especificaciones del proveedor únicamente cumple con los porcentajes de carbono y silicio.
- El acero AISI 5115 evaluado posee una dureza promedio de 4.5 según el ensayo realizado este valor se encuentra cercano al límite inferior, sin embargo, no cumple con las especificaciones de dureza dadas por el fabricante para esta aleación, el cual corresponde entre 5HRC-15HRC.
- El dimensionamiento de las probetas a cementar y nitrurar se realizó considerando los criterios establecidos en la norma NTE INEN-ISO 6508-1 y ASTM E384-17, donde corresponde a un diámetro 50.8 mm, altura 25.4 mm, con un biselado de 0.2mm.
- El tratamiento térmico superficial para la cementación corresponde al tipo de cementación sólida, donde se empleó carbón durferrit con un tiempo de 1, 2, 3 y 4 horas a una temperatura de 930°C para un temple y posterior mente un revenido a 200°C.
- El tratamiento superficial para la nitruración corresponde al tipo de nitruración conocida como baño de sales, en la que se utiliza sal fundida compuesta por cianato y carbonato, a una temperatura de 550°C.
- Las durezas alcanzadas en las probetas cementadas corresponden a 54, 54.67, 61.03 y 62.01HRC con un tiempo de permanencia de 1, 2 ,3 y 4 respectivamente, mientras que la dureza alcanzadas en las probetas nitruradas corresponde a 25, 52, 54 y 55HRC para los mismos tiempos de permanencia.
- Se observa que al cambiar el tiempo de los tratamientos térmicos superficiales la dureza y espesor de capa se ven incrementado, en el caso del cementado después de 3 horas la dureza tiende a ser constante en un valor de 61 HRC, mientras que para el tratamiento de nitrurado después de 3 horas su dureza tiende a ser 586HV o 54HRC.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda verificar las propiedades mecánicas de los materiales de especificación AISI 5115 (nombre comercial E410) que se encuentran en estado de suministro antes de la puesta en servicio
- Considerar en todo momento para el diseño y fabricación de probetas que sean sometidas a procesos de nitruración y cementación los criterios establecidos en la norma NTE INEN-ISO 6508-1 y ASTM E384-17 a efecto de no incurrir en desviaciones desde el punto de vista de dimensionamiento.
- Se recomienda que el tratamiento térmico superficial de cementado no se lo realice por más de 3 horas, ya que la mejora en la dureza es insignificante comparada con la energía que se necesita para mantener el tratamiento por más tiempo basados en los resultados en la presente investigación.
- Mantener un control cuidadoso en el monitoreo de la temperatura y el tiempo en los procesos de tratamiento térmico superficial de cementado y nitrurado a efecto de lograr la transformación en la estructura granular y de fase.
- Es recomendable realizar para el material AISI 5115 el tratamiento térmico superficial de cementado en lugar del proceso de nitruración ya que el mejoramiento de las propiedades mecánicas resulta más óptimo en el cementado

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Zapata, “DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS I”, Universidad Nacional de Piura, 2013.
- [2] L. M. GÓMEZ, “Acero”, Mexico, 1997.
- [3] F. J. Dóminguez Equiza, “Elemetos de Máquinas”, Madrid: MARCOMBO,S.A., 2018.
- [4] A. E. S. G. & C. KG, “ACERO PREMIUM”, *Datos Técnicos F.1516*, pp. 1-4.
- [5] R. Singh, “Applied Welding Engineering Processes”, Codes, and Standards, vol. 2nd, Butterworth-Heinemann: Copyright © 2016 Elsevier Inc. All rights reserved., 2016.
- [6] SAE, “Clasificacion de los aceros”, 2018.
- [7] IVAN BOHMAN C.A., “CATÁLOGO DE PRODUCTOS”, *IBCA*, pp. 1-403, 1935.
- [8] M. Service, “CARACTERÍSTICAS ACEROS ESPECIALES”, *Metal Service*, p. 10, 2002.
- [9] N. Martín Piris, “Ciencia de Materiales para Ingenieros”, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A., 2012.
- [10] D. R. Askeland, “Ciencia e ingeniería de materiales”, México: Impresos Vacha, S.A, 2013.
- [11] W. D. Callister, “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”, México: Reverté S.A., 2002.
- [12] Federación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, “Metalografía”, *Temas para la educación*, pp. 1-4, 2011.
- [13] J. A. Barreiro, “Tratamientos Térmicos de los Aceros”, Madrid, 1949.

- [14] Thyssenkrupp Materials Ibérica S.A., “Estudio y Clasificación de los Aceros, 2016.
- [15] F. DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ y A. REYES SOLÍS, “ACEROS, ESTRUCTURAS Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, 2012.
- [16] M. E. Sánchez Vergara y I. E. Campos Silva, “TECNOLOGÍA DE MATERIALES”, México : trillas, 2010.
- [17] R. D. J. C. ROJAS, “PREDICCIÓN DE LA DISTORSIÓN EN ANILLOS ROLADOS SIN COSTURA DURANTE TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE Y REVENIDO USANDO SIMULACIÓN NUMÉRICA.”, 11 2015.
- [18] J. Apraiz, “Aceros especiales y otras aleaciones”, DOSSAT, 1975.
- [19] G. Salvatore, “Modelado de variables de proceso de tratameinto termico”, 2016.
- [20] M. E. Guerrero y L. A. Pavón, “Diseño e Implementación de un Sistema de Control de Temperatura Para un Equipo de Tratamiento Térmico Localizado En ACINDEC S.A”, *Termo Soldex S.A.*, pp. 12-32, 2004.
- [21] Tecnología Industrial II, “T3_tratamientos_termicos”, pp. 1-5.
- [22] J. C. Gil Espinosa, E. Berbós Almera y T. Herránz Cortés, “MANUAL DE MECANICA INDUSTRIAL”, vol. tomo I, MADRID: CULTURAL, S.A..
- [23] A. Carranza Garcia, “SlideShare”, 31 03 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/albertojecha/revenido>.
- [24] Universidad de Santiago de Chile, “TRATAMIENTOS TÉRMICOS”, 2014.
- [25] C. Ferrer Giménez y V. Amigó Borrás, “Tecnologia de Materiales, Valencia: Alfaomega Grupo Editor”, 2005.
- [26] E. Alvarado, “Metalografía y Tratamientos Térmicos”.
- [27] J. A. Puértolas, R. Ríos, M. Castro Corella y J. M. Casals, “Tecnología de suerficies en materiales”, Madrid: SINTESIS, 2010.

- [28] P. Molera, “Tratamiento termico de los materiales”, MARCOMBO, 1991.
- [29] NTE INEN, “NTE INEN-ISO 6508-1”, Quito, 2014.
- [30] ASTM, “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”, 2019.
- [31] ASTM, “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, 2017.
- [32] L. Muiño, “Nitrocarburation mediante el proceso TENIFER®QPQ de aceros inoxidables austeníticos estabilizados: caracterización química y estudio de su comportamiento frente al desgaste y la corrosión”, 2015.
- [33] C. Villar, “Nitruración por plasma vs nitruración líquida”, 2015.
- [34] A. Sanchez, “CEMENTACION”, 2016.
- [35] Bohler, “MANUAL DE ACEROS ESPECIALES”, *ACEROS BOEHLER DEL ECUADOR S.A.*, 2007.

ANEXOS

Anexos 1: Encuestas



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Quito, 09 noviembre de 2018

CERTIFICADO

El Sr. César Humberto Lema Lema con C.I. 0501534465 de la empresa COOPERACION TECNICA INDUSTRIAL ha Contestado las preguntas propuestas por JONATHAN FABRICIO PANCHI CONCHA con C.I. 1723005730 y MIGUEL ANGEL GUALOTO GUACOLLANTE con C.I. 1720751955 información requerida para el proyecto técnico de titulación con el tema DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO A TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.

ENCUESTA

1. En qué porcentaje trabaja la empresa con el material AISI 5115.
En 10%
2. Que elementos mecánicos fabrica la empresa con material AISI 5115.
Pisones y estriador
- 3.Cuál es el tratamiento térmico que utiliza la empresa para el material AISI 5115.
CEMENTACIÓN.
4. Como es el proceso que realiza la empresa de tratamiento térmico al material AISI 5115.
Terminado el mecanizado de cualquier elemento a cementar se envía a otra empresa (BOHLER)

Observaciones:

Para llevar un conocimiento más fluido como fabricante lo recomiendo que exista tablas por función de temperatura y profundidad de cementado.

Firma y Sello de la Empresa

COOPERACION TECNICA
INDUSTRIAL

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Quito, 09 noviembre de 2018

CERTIFICADO

El Sr. Milton Jauhi con C.I. 1707254191 de la empresa HAYPROH. Muebles y Fabricación ha Contestado las preguntas propuestas por JONATHAN FABRICIO PANCHI CONCHA con C.I. 1723005730 y MIGUEL ANGEL GUALOTO GUACOLLANTE con C.I. 1720751955 información requerida para el proyecto técnico de titulación con el tema DETERMINACIÓN DE DUREZA EN EL MATERIAL AISI 5115 SOMETIDO A TRATAMIENTO TÉRMICO DE CEMENTADO Y NITRURADO.

ENCUESTA

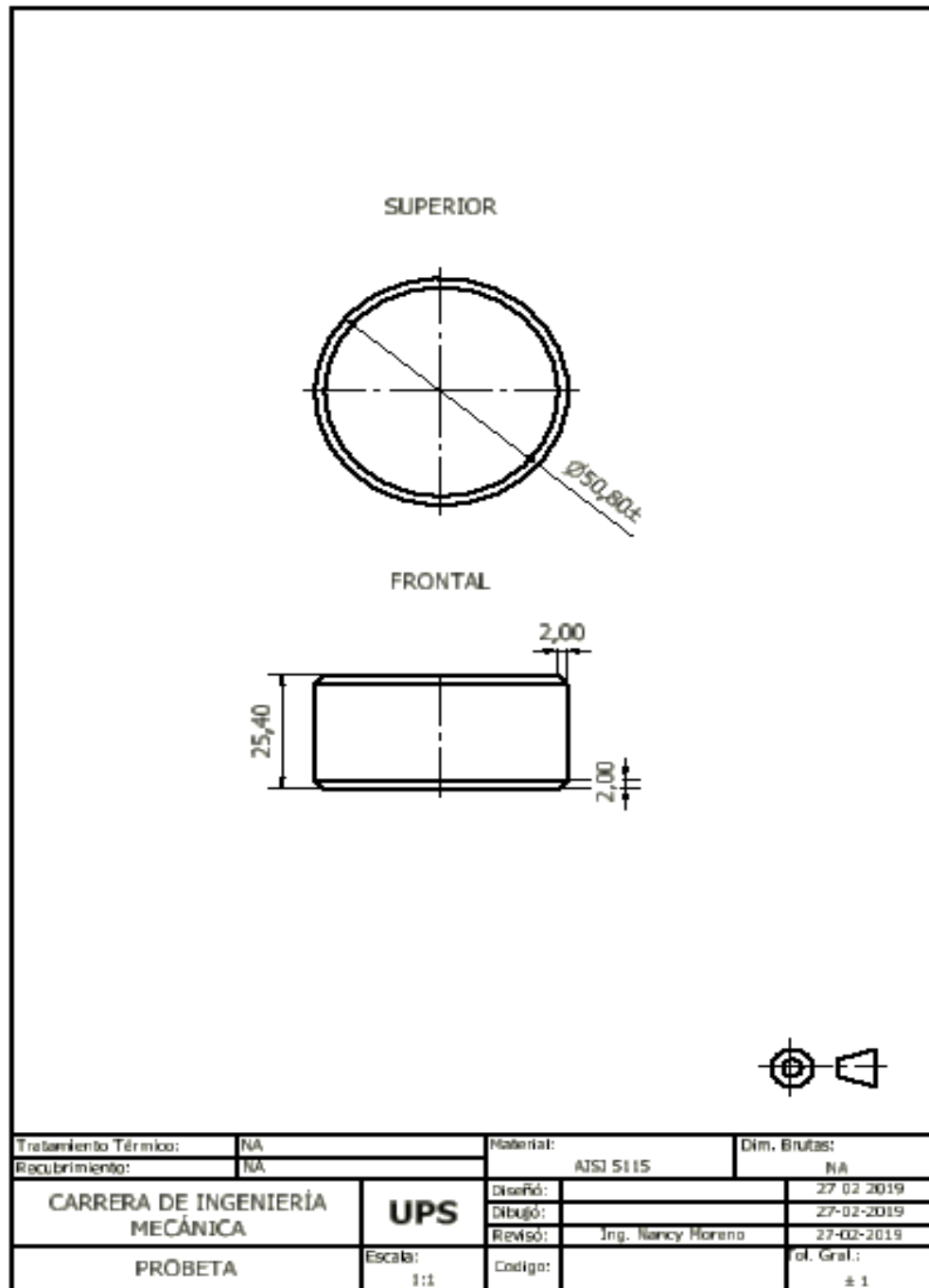
1. En qué porcentaje trabaja la empresa con el material AISI 5115.
20%
2. Que elementos mecánicos fabrica la empresa con material AISI 5115.
Pipera, rodillos
lavo.
- 3.Cuál es el tratamiento térmico que utiliza la empresa para el material AISI 5115.
Cementado
4. Como es el proceso que realiza la empresa de tratamiento térmico al material AISI 5115.
con carbon durferit.

Observaciones:


Firma y Sello de la Empresa

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 2: Plano de la probeta



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 3: Elementos químicos mediante el ensayo de espectrofotométrico

Resultados de la probeta 1

16	Optik 52U0017						
:							
:	FE_150	Mode	: PA 21/02/2019 08:05:38				
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
96.7	0.178	0.251	1.28	0.0121	0.0354	<	0.0010
96.7	0.183	0.251	1.29	0.0138	0.0335		0.0014
96.8	0.177	0.259	1.29	0.0139	0.0340		0.0012
96.8	0.185	0.259	1.31	0.0136	0.0345		0.0014
96.8	0.172	0.250	1.30	0.0145	0.0331		0.0027
96.8	0.179	0.249	1.31	0.0147	0.0333		0.0028
96.8	0.179	0.253	1.30	0.0138	0.0340		0.0017
	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1.12	0.0064	0.0731	0.0272	0.0041	0.205	<	0.0005
1.08	0.0083	0.0725	0.0271	0.0056	0.207	<	0.0005
0.944	0.0081	0.0733	0.0270	0.0064	0.211	<	0.0005
0.952	0.0083	0.0731	0.0287	0.0066	0.214	<	0.0005
0.941	0.0078	0.0742	0.0272	0.0065	0.213	<	0.0005
0.957	0.0102	0.0752	0.0280	0.0066	0.212	<	0.0005
1.00	0.0082	0.0736	0.0275	0.0059	0.211	<	0.0005
	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
0.0363	0.0031	< 0.0100	0.0204	0.0013	0.0005		0.0052
0.0395	0.0035	< 0.0100	0.0214	0.0012	0.0005		0.0059
0.0423	0.0032	< 0.0100	0.0214	0.0015	0.0005		0.0064
0.0408	0.0037	< 0.0100	0.0221	0.0012	0.0005		0.0069
0.0401	0.0031	< 0.0100	0.0221	0.0014	0.0005		0.0075
0.0405	0.0038	< 0.0100	0.0222	0.0014	0.0005		0.0081
0.0399	0.0034	< 0.0100	0.0216	0.0013	0.0005		0.0067
	Zn	Bi	As	Se	Sb		
0.0046	0.0079	0.0097	0.0114	0.0214			
0.0045	0.0087	0.0111	0.0123	0.0262			
0.0046	0.0086	0.0116	0.0117	0.0252			
0.0048	0.0089	0.0118	0.0116	0.0283			
0.0050	0.0092	0.0120	0.0124	0.0313			
0.0049	0.0103	0.0119	0.0130	0.0301			
0.0047	0.0089	0.0114	0.0121	0.0271			

Promedio de los resultados de la probeta 1

FMX 52U0016		Optik 52U0017			
Sample :					
Alloy : FE_150		Mode : PA 21/02/2019 08:05:38			
Number of burns : 6					
Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.8	0.0594	0.1	96.7	96.8
C %	0.179	0.0048	2.7	0.172	0.185
Si %	0.253	0.0044	1.8	0.249	0.259
Mn %	1.30	0.0151	1.2	1.28	1.31
P %	0.0138	0.0009	6.8	0.0121	0.0147
S %	0.0340	0.0008	2.6	0.0331	0.0354
Pb %	0.0017	0.0008	49.5	< 0.0010	0.0028
Cr %	1.00	0.0805	8.0	0.941	1.12
Mo %	0.0082	0.0011	14.4	0.0064	0.0102
Ni %	0.0736	0.0009	1.4	0.0725	0.0752
Al %	0.0275	0.0006	2.5	0.0270	0.0287
Co %	0.0059	0.0009	16.7	0.0041	0.0066
Cu %	0.211	0.0034	1.6	0.205	0.214
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0399	0.0020	5.1	0.0363	0.0423
V %	0.0034	0.0003	9.5	0.0031	0.0038
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0216	0.0006	3.2	0.0204	0.0222
B %	0.0013	0.0001	9.1	0.0012	0.0015
Ca %	0.0005	0.0000	5.4	0.0005	0.0005
Zr %	0.0067	0.0010	15.8	0.0052	0.0081
Zn %	0.0047	0.0002	4.3	0.0045	0.0050
Bi %	0.0089	0.0007	8.8	0.0079	0.0103
As %	0.0114	0.0008	7.4	0.0097	0.0120
Se %	0.0121	0.0006	5.0	0.0114	0.0130
Sb %	0.0271	0.0036	13.3	0.0214	0.0313

Resultados de la probeta 2

FMX 52U0016		Optik 52U0017					
Sample :							
Alloy	: FE_150	Mode	:	PA 21/02/2019 08:15:50			
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
2	96.8	0.170	0.246	1.32	0.0146	0.0346	0.0023
4	96.8	0.167	0.243	1.31	0.0149	0.0361	0.0029
5	96.9	0.167	0.241	1.26	0.0164	0.0348	0.0033
6	96.8	0.172	0.239	1.33	0.0162	0.0359	0.0036
7	96.8	0.163	0.243	1.31	0.0167	0.0414	0.0035
8	96.8	0.169	0.236	1.31	0.0163	0.0326	0.0046
Average	96.8	0.168	0.241	1.31	0.0158	0.0359	0.0034
	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
2	0.943	0.0088	0.0726	0.0270	0.0053	0.204	< 0.0005
4	0.953	0.0075	0.0734	0.0278	0.0074	0.210	< 0.0005
5	0.924	0.0097	0.0738	0.0269	0.0060	0.214	< 0.0005
6	0.958	0.0102	0.0746	0.0281	0.0061	0.214	< 0.0005
7	0.951	0.0106	0.0753	0.0279	0.0056	0.214	< 0.0005
8	0.965	0.0107	0.0750	0.0268	0.0059	0.209	< 0.0005
Average	0.949	0.0096	0.0741	0.0274	0.0061	0.211	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0386	0.0030	< 0.0100	0.0212	0.0016	0.0004	0.0068
4	0.0401	0.0036	< 0.0100	0.0216	0.0015	0.0005	0.0069
5	0.0411	0.0031	< 0.0100	0.0232	0.0016	0.0003	0.0080
6	0.0423	0.0036	< 0.0100	0.0217	0.0015	0.0004	0.0082
7	0.0445	0.0040	< 0.0100	0.0227	0.0016	0.0004	0.0083
8	0.0410	0.0038	< 0.0100	0.0229	0.0016	0.0004	0.0091
Average	0.0413	0.0035	< 0.0100	0.0222	0.0016	0.0004	0.0079

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0050	0.0089	0.0120	0.0117	0.0305
4	0.0047	0.0103	0.0132	0.0141	0.0341
5	0.0052	0.0099	0.0122	0.0131	0.0338
6	0.0052	0.0113	0.0132	0.0137	0.0400
7	0.0055	0.0107	0.0127	0.0136	0.0376
8	0.0056	0.0115	0.0137	0.0142	0.0440
Average	0.0052	0.0104	0.0128	0.0134	0.0367

Promedio de los resultados de la probeta 2

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:15:50

Number of burns : 6

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.8	0.0430	0.0	96.8	96.9
C %	0.168	0.0029	1.8	0.163	0.172
Si %	0.241	0.0035	1.5	0.236	0.246
Mn %	1.31	0.0247	1.9	1.26	1.33
P %	0.0158	0.0008	5.5	0.0146	0.0167
S %	0.0359	0.0029	8.2	0.0326	0.0414
Pb %	0.0034	0.0007	22.9	0.0023	0.0046
Cr %	0.949	0.0143	1.5	0.924	0.965
Mo %	0.0096	0.0012	12.9	0.0075	0.0107
Ni %	0.0741	0.0010	1.4	0.0726	0.0753
Al %	0.0274	0.0005	2.1	0.0268	0.0281
Co %	0.0061	0.0007	11.8	0.0053	0.0074
Cu %	0.211	0.0037	1.8	0.204	0.214
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0413	0.0020	4.9	0.0386	0.0445
V %	0.0035	0.0003	10.9	0.0030	0.0040
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0222	0.0007	3.6	0.0212	0.0232
B %	0.0016	0.0000	2.1	0.0015	0.0016
Ca %	0.0004	0.0000	12.4	0.0003	0.0005
Zr %	0.0079	0.0008	11.0	0.0068	0.0091
Zn %	0.0052	0.0003	6.7	0.0047	0.0056
Bi %	0.0104	0.0009	9.1	0.0089	0.0115
As %	0.0128	0.0006	5.1	0.0120	0.0137
Se %	0.0134	0.0009	6.8	0.0117	0.0142
Sb %	0.0367	0.0048	13.2	0.0305	0.0440

Resultados de la probeta 3

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:23:11

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
1	96.8	0.170	0.238	1.30	0.0157	0.0355	0.0031
2	96.9	0.173	0.242	1.28	0.0159	0.0378	0.0036
3	96.8	0.170	0.254	1.27	0.0155	0.0337	0.0035
4	96.8	0.174	0.244	1.28	0.0166	0.0339	0.0041
9	96.8	0.161	0.246	1.26	0.0155	0.0343	0.0028
10	96.7	0.163	0.244	1.33	0.0165	0.0351	0.0039
Average	96.8	0.168	0.244	1.29	0.0159	0.0350	0.0035

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	0.959	0.0081	0.0736	0.0271	0.0056	0.209	< 0.0005
2	0.905	0.0086	0.0732	0.0269	0.0050	0.208	< 0.0005
3	0.931	0.0111	0.0749	0.0275	0.0050	0.210	< 0.0005
4	0.933	0.0120	0.0753	0.0270	0.0046	0.206	< 0.0005
9	1.04	0.0068	0.0702	0.0261	0.0048	0.205	< 0.0005
10	1.01	0.0069	0.0706	0.0266	0.0063	0.211	< 0.0005
Average	0.964	0.0089	0.0730	0.0269	0.0052	0.208	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
1	0.0417	0.0036	< 0.0100	0.0225	0.0015	0.0005	0.0078
2	0.0422	0.0031	< 0.0100	0.0225	0.0019	0.0005	0.0083
3	0.0431	0.0032	< 0.0100	0.0236	0.0016	0.0006	0.0085
4	0.0413	0.0031	< 0.0100	0.0235	0.0016	0.0005	0.0089
9	0.0388	0.0028	< 0.0100	0.0222	0.0015	0.0005	0.0061
10	0.0401	0.0034	< 0.0100	0.0216	0.0016	0.0003	0.0063
Average	0.0412	0.0032	< 0.0100	0.0226	0.0016	0.0005	0.0076

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0053	0.0104	0.0130	0.0139	0.0410
2	0.0061	0.0103	0.0130	0.0133	0.0433
3	0.0055	0.0115	0.0141	0.0145	0.0444
4	0.0058	0.0122	0.0140	0.0144	0.0500
9	0.0048	0.0095	0.0126	0.0131	0.0352
10	0.0049	0.0105	0.0128	0.0144	0.0388
Average	0.0054	0.0107	0.0133	0.0139	0.0421

Promedio de los resultados de la probeta 8

FMX 52U0016 Optik 52U0017
Sample :
Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:23:11

Number of burns : 6					
Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.8	0.0471	0.0	96.7	96.9
C %	0.168	0.0050	3.0	0.161	0.174
Si %	0.244	0.0052	2.1	0.238	0.254
Mn %	1.29	0.0248	1.9	1.26	1.33
P %	0.0159	0.0004	3.0	0.0155	0.0166
S %	0.0350	0.0014	4.3	0.0337	0.0378
Pb %	0.0035	0.0005	14.2	0.0028	0.0041
Cr %	0.964	0.0534	5.5	0.905	1.04
Mo %	0.0089	0.0021	24.0	0.0068	0.0120
Ni %	0.0730	0.0021	2.9	0.0702	0.0753
Al %	0.0269	0.0004	1.7	0.0261	0.0275
Co %	0.0052	0.0006	11.6	0.0046	0.0063
Cu %	0.208	0.0023	1.1	0.205	0.211
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0412	0.0015	3.7	0.0388	0.0431
V %	0.0032	0.0002	8.2	0.0028	0.0036
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0226	0.0007	3.4	0.0216	0.0236
B %	0.0016	0.0001	9.2	0.0015	0.0019
Ca %	0.0005	0.0000	16.9	0.0003	0.0006
Zr %	0.0076	0.0011	15.2	0.0061	0.0089
Zn %	0.0054	0.0005	9.5	0.0048	0.0061
Bi %	0.0107	0.0009	8.9	0.0095	0.0122
As %	0.0133	0.0006	4.9	0.0126	0.0141
Se %	0.0139	0.0006	4.4	0.0131	0.0145
Sb %	0.0421	0.0050	12.0	0.0352	0.0500

Resultados de la probeta 4

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:28:22

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
2	96.7	0.188	0.255	1.28	0.0167	0.0348	0.0030
3	96.7	0.165	0.245	1.31	0.0146	0.0328	0.0027
4	96.8	0.167	0.241	1.31	0.0159	0.0359	0.0033
6	96.7	0.168	0.245	1.31	0.0166	0.0324	0.0034
7	96.7	0.162	0.246	1.31	0.0149	0.0349	0.0037
8	96.7	0.167	0.239	1.31	0.0156	0.0341	0.0034
Average	96.7	0.170	0.245	1.31	0.0157	0.0341	0.0032

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
2	1.06	0.0091	0.0707	0.0272	0.0054	0.209	< 0.0005
3	1.09	0.0072	0.0697	0.0257	0.0061	0.203	< 0.0005
4	1.00	0.0070	0.0707	0.0262	0.0055	0.209	< 0.0005
6	1.06	0.0067	0.0689	0.0265	0.0067	0.207	< 0.0005
7	1.09	0.0066	0.0691	0.0261	0.0047	0.204	< 0.0005
8	1.05	0.0084	0.0696	0.0254	0.0063	0.205	< 0.0005
Average	1.06	0.0075	0.0698	0.0262	0.0058	0.206	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0381	0.0031	< 0.0100	0.0231	0.0016	0.0003	0.0056
3	0.0366	0.0038	< 0.0100	0.0224	0.0015	0.0004	0.0055
4	0.0381	0.0040	< 0.0100	0.0228	0.0013	0.0004	0.0061
6	0.0366	0.0030	< 0.0100	0.0223	0.0014	0.0005	0.0053
7	0.0379	0.0039	< 0.0100	0.0229	0.0011	0.0003	0.0055
8	0.0385	0.0027	< 0.0100	0.0219	0.0011	0.0004	0.0059
Average	0.0376	0.0034	< 0.0100	0.0226	0.0013	0.0004	0.0056

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0045	0.0098	0.0122	0.0131	0.0313
3	0.0043	0.0092	0.0130	0.0137	0.0351
4	0.0046	0.0100	0.0118	0.0134	0.0369
6	0.0047	0.0100	0.0133	0.0144	0.0407
7	0.0044	0.0096	0.0118	0.0133	0.0344
8	0.0044	0.0102	0.0126	0.0141	0.0374
Average	0.0045	0.0098	0.0124	0.0137	0.0360

Promedio de los resultados de la probeta 4

FMX 52U0016 Optik 52U0017
Sample :
Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:28:22

Number of burns : 6					
Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.7	0.0303	0.0	96.7	96.8
C %	0.170	0.0094	5.5	0.162	0.188
Si %	0.245	0.0055	2.3	0.239	0.255
Mn %	1.31	0.0123	0.9	1.28	1.31
P %	0.0157	0.0008	5.5	0.0146	0.0167
S %	0.0341	0.0013	3.9	0.0324	0.0359
Pb %	0.0032	0.0003	10.4	0.0027	0.0037
Cr %	1.06	0.0315	3.0	1.00	1.09
Mo %	0.0075	0.0009	13.1	0.0066	0.0091
Ni %	0.0698	0.0007	1.1	0.0689	0.0707
Al %	0.0262	0.0006	2.4	0.0254	0.0272
Co %	0.0058	0.0007	12.4	0.0047	0.0067
Cu %	0.206	0.0025	1.2	0.203	0.209
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0376	0.0008	2.2	0.0366	0.0385
V %	0.0034	0.0005	15.2	0.0027	0.0040
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0226	0.0004	2.0	0.0219	0.0231
B %	0.0013	0.0002	15.3	0.0011	0.0016
Ca %	0.0004	0.0000	19.4	0.0003	0.0005
Zr %	0.0056	0.0002	5.0	0.0053	0.0061
Zn %	0.0045	0.0001	3.4	0.0043	0.0047
Bi %	0.0098	0.0003	3.6	0.0092	0.0102
As %	0.0124	0.0006	5.2	0.0118	0.0133
Se %	0.0137	0.0005	3.7	0.0131	0.0144
Sb %	0.0360	0.0031	8.8	0.0313	0.0407

Resultados de la probeta 5

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:34:51

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
1	96.8	0.154	0.252	1.33	0.0151	0.0320	0.0033
2	96.8	0.158	0.255	1.30	0.0163	0.0329	0.0038
3	96.8	0.152	0.243	1.27	0.0154	0.0328	0.0036
4	96.8	0.158	0.242	1.33	0.0163	0.0332	0.0038
6	96.8	0.156	0.249	1.32	0.0166	0.0371	0.0040
8	96.7	0.151	0.244	1.33	0.0163	0.0347	0.0043
Average	96.8	0.155	0.248	1.31	0.0160	0.0338	0.0038

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	0.964	0.0088	0.0712	0.0262	0.0063	0.209	< 0.0005
2	0.952	0.0080	0.0710	0.0275	0.0057	0.208	< 0.0005
3	0.948	0.0077	0.0718	0.0261	0.0054	0.208	< 0.0005
4	0.965	0.0091	0.0728	0.0266	0.0059	0.209	< 0.0005
6	0.953	0.0113	0.0736	0.0263	0.0053	0.209	< 0.0005
8	0.959	0.0122	0.0768	0.0267	0.0056	0.208	< 0.0005
Average	0.957	0.0095	0.0729	0.0266	0.0057	0.209	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
1	0.0392	0.0028	< 0.0100	0.0229	0.0016	0.0004	0.0065
2	0.0383	0.0030	< 0.0100	0.0231	0.0016	0.0004	0.0064
3	0.0390	0.0036	< 0.0100	0.0229	0.0016	0.0004	0.0067
4	0.0397	0.0044	< 0.0100	0.0240	0.0017	0.0005	0.0073
6	0.0416	0.0038	< 0.0100	0.0226	0.0017	0.0004	0.0086
8	0.0428	0.0037	< 0.0100	0.0236	0.0016	0.0006	0.0103
Average	0.0401	0.0036	< 0.0100	0.0232	0.0016	0.0004	0.0076

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0053	0.0099	0.0134	0.0132	0.0417
2	0.0056	0.0102	0.0138	0.0147	0.0485
3	0.0051	0.0104	0.0135	0.0140	0.0461
4	0.0053	0.0109	0.0135	0.0146	0.0521
6	0.0055	0.0123	0.0137	0.0146	0.0525
8	0.0063	0.0136	0.0144	0.0153	0.0558
Average	0.0055	0.0112	0.0137	0.0144	0.0494

Promedio de los resultados de la probeta 5

PMX 52U0016 Optik 52U0017
 Sample :
 Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:34:51

Number of burns : 6					
Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.8	0.0394	0.0	96.7	96.8
C %	0.155	0.0029	1.9	0.151	0.158
Si %	0.248	0.0055	2.3	0.242	0.255
Mn %	1.31	0.0235	1.8	1.27	1.33
P %	0.0160	0.0005	3.7	0.0151	0.0166
S %	0.0338	0.0018	5.5	0.0320	0.0371
Pb %	0.0038	0.0003	9.4	0.0033	0.0043
Cr %	0.957	0.0068	0.7	0.948	0.965
Mo %	0.0095	0.0017	18.5	0.0077	0.0122
Ni %	0.0729	0.0021	3.0	0.0710	0.0768
Al %	0.0266	0.0004	1.9	0.0261	0.0275
Co %	0.0057	0.0003	6.6	0.0053	0.0063
Cu %	0.209	0.0005	0.3	0.208	0.209
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0401	0.0017	4.3	0.0383	0.0428
V %	0.0036	0.0005	15.3	0.0028	0.0044
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0232	0.0005	2.3	0.0226	0.0240
B %	0.0016	0.0000	3.9	0.0016	0.0017
Ca %	0.0004	0.0000	17.3	0.0004	0.0006
Zr %	0.0076	0.0015	19.7	0.0064	0.0103
Zn %	0.0055	0.0004	7.4	0.0051	0.0063
Bi %	0.0112	0.0014	12.7	0.0099	0.0136
As %	0.0137	0.0003	2.7	0.0134	0.0144
Se %	0.0144	0.0007	4.9	0.0132	0.0153
Sb %	0.0494	0.0051	10.3	0.0417	0.0558

Resultados de la probeta 6

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:45:54

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
1	96.7	0.166	0.262	1.31	0.0144	0.0298	0.0048
2	96.7	0.159	0.257	1.32	0.0148	0.0295	0.0046
3	96.7	0.176	0.254	1.30	0.0150	0.0284	0.0047
4	96.7	0.157	0.251	1.30	0.0151	0.0286	0.0052
5	96.7	0.178	0.249	1.31	0.0147	0.0291	0.0049
6	96.7	0.171	0.250	1.29	0.0150	0.0294	0.0055
Average	96.7	0.168	0.254	1.31	0.0148	0.0291	0.0049

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	1.06	0.0125	0.0803	0.0275	0.0066	0.207	< 0.0005
2	1.07	0.0120	0.0785	0.0269	0.0053	0.215	< 0.0005
3	1.08	0.0114	0.0781	0.0264	0.0052	0.210	< 0.0005
4	1.08	0.0117	0.0797	0.0260	0.0061	0.210	< 0.0005
5	1.06	0.0114	0.0786	0.0268	0.0056	0.213	< 0.0005
6	1.07	0.0116	0.0767	0.0268	0.0059	0.213	< 0.0005
Average	1.07	0.0118	0.0786	0.0268	0.0058	0.211	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
1	0.0367	0.0036	< 0.0100	0.0191	0.0010	0.0003	0.0044
2	0.0355	0.0039	< 0.0100	0.0195	0.0010	0.0002	0.0047
3	0.0373	0.0033	< 0.0100	0.0194	0.0010	0.0001	0.0050
4	0.0387	0.0039	< 0.0100	0.0196	0.0010	0.0002	0.0054
5	0.0360	0.0035	< 0.0100	0.0187	0.0008	0.0002	0.0050
6	0.0352	0.0034	< 0.0100	0.0190	0.0010	0.0002	0.0051
Average	0.0366	0.0036	< 0.0100	0.0192	0.0010	0.0002	0.0049

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0068	0.0121	0.0084	0.0102	0.0045
2	0.0060	0.0120	0.0084	0.0102	0.0047
3	0.0028	0.0131	0.0084	0.0099	0.0045
4	0.0028	0.0132	0.0085	0.0105	0.0056
5	0.0026	0.0129	0.0088	0.0105	0.0052
6	0.0029	0.0134	0.0090	0.0106	0.0052
Average	0.0040	0.0128	0.0086	0.0103	0.0049

Promedio de los resultados de la probeta 6

FMX 52U0016 Optik 52U0017
Sample :
Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:45:54

Number of burns : 6

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.7	0.0082	0.0	96.7	96.7
C %	0.168	0.0086	5.1	0.157	0.178
Si %	0.254	0.0049	1.9	0.249	0.262
Mn %	1.31	0.0087	0.7	1.29	1.32
P %	0.0148	0.0002	1.8	0.0144	0.0151
S %	0.0291	0.0005	1.8	0.0284	0.0298
Pb %	0.0049	0.0003	6.7	0.0046	0.0055
Cr %	1.07	0.0086	0.8	1.06	1.08
Mo %	0.0118	0.0004	3.8	0.0114	0.0125
Ni %	0.0786	0.0012	1.6	0.0767	0.0803
Al %	0.0268	0.0005	1.9	0.0260	0.0275
Co %	0.0058	0.0005	9.3	0.0052	0.0066
Cu %	0.211	0.0028	1.4	0.207	0.215
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0366	0.0013	3.6	0.0352	0.0387
V %	0.0036	0.0002	6.4	0.0033	0.0039
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0192	0.0003	1.7	0.0187	0.0196
B %	0.0010	0.0000	6.2	0.0008	0.0010
Ca %	0.0002	0.0000	14.5	0.0001	0.0003
Zr %	0.0049	0.0003	6.8	0.0044	0.0054
Zn %	0.0040	0.0018	46.9	0.0026	0.0068
Bi %	0.0128	0.0005	4.6	0.0120	0.0134
As %	0.0086	0.0002	2.7	0.0084	0.0090
Se %	0.0103	0.0002	2.5	0.0099	0.0106
Sb %	0.0049	0.0004	9.1	0.0045	0.0056

Resultados de la probeta 7

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:50:43

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
1	96.8	0.157	0.249	1.29	0.0148	0.0319	0.0047
3	96.7	0.175	0.249	1.31	0.0149	0.0289	0.0049
4	96.7	0.164	0.249	1.31	0.0153	0.0311	0.0048
5	96.7	0.173	0.254	1.32	0.0155	0.0303	0.0050
7	96.7	0.177	0.251	1.31	0.0152	0.0309	0.0049
8	96.7	0.169	0.250	1.32	0.0151	0.0306	0.0051
Average	96.7	0.169	0.250	1.31	0.0151	0.0306	0.0049

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
1	1.06	0.0116	0.0767	0.0266	0.0055	0.209	< 0.0005
3	1.06	0.0116	0.0767	0.0266	0.0068	0.209	< 0.0005
4	1.07	0.0113	0.0765	0.0270	0.0064	0.214	< 0.0005
5	1.06	0.0105	0.0770	0.0273	0.0054	0.215	< 0.0005
7	1.06	0.0101	0.0760	0.0270	0.0053	0.209	< 0.0005
8	1.08	0.0115	0.0787	0.0262	0.0057	0.210	< 0.0005
Average	1.07	0.0111	0.0769	0.0268	0.0058	0.211	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
1	0.0361	0.0036	< 0.0100	0.0191	0.0011	0.0002	0.0048
3	0.0356	0.0038	< 0.0100	0.0193	0.0009	0.0001	0.0047
4	0.0384	0.0033	< 0.0100	0.0199	0.0011	0.0002	0.0049
5	0.0369	0.0035	< 0.0100	0.0198	0.0009	0.0001	0.0049
7	0.0358	0.0030	< 0.0100	0.0189	0.0010	0.0002	0.0051
8	0.0383	0.0030	< 0.0100	0.0191	0.0012	0.0003	0.0058
Average	0.0369	0.0034	< 0.0100	0.0193	0.0010	0.0002	0.0050

	Zn	Bi	As	Se	Sb
1	0.0027	0.0125	0.0083	0.0102	0.0055
3	0.0025	0.0127	0.0091	0.0102	0.0056
4	0.0026	0.0130	0.0094	0.0109	0.0054
5	0.0027	0.0134	0.0098	0.0107	0.0062
7	0.0025	0.0136	0.0088	0.0109	0.0059
8	0.0026	0.0137	0.0089	0.0110	0.0062
Average	0.0026	0.0132	0.0090	0.0106	0.0058

Promedio de los resultados de la probeta 7

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:50:43

Number of burns : 6

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.7	0.0225	0.0	96.7	96.8
C %	0.169	0.0075	4.5	0.157	0.177
Si %	0.250	0.0020	0.8	0.249	0.254
Mn %	1.31	0.0111	0.8	1.29	1.32
P %	0.0151	0.0002	1.7	0.0148	0.0155
S %	0.0306	0.0009	3.2	0.0289	0.0319
Pb %	0.0049	0.0001	2.6	0.0047	0.0051
Cr %	1.07	0.0056	0.5	1.06	1.08
Mo %	0.0111	0.0006	5.7	0.0101	0.0116
Ni %	0.0769	0.0009	1.2	0.0760	0.0787
Al %	0.0268	0.0003	1.5	0.0262	0.0273
Co %	0.0058	0.0006	10.3	0.0053	0.0068
Cu %	0.211	0.0028	1.3	0.209	0.215
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0369	0.0012	3.4	0.0356	0.0384
V %	0.0034	0.0003	9.6	0.0030	0.0038
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0193	0.0003	2.0	0.0189	0.0199
B %	0.0010	0.0001	11.9	0.0009	0.0012
Ca %	0.0002	0.0000	26.9	0.0001	0.0003
Zr %	0.0050	0.0004	7.9	0.0047	0.0058
Zn %	0.0026	0.0000	2.9	0.0025	0.0027
Bi %	0.0132	0.0004	3.7	0.0125	0.0137
As %	0.0090	0.0005	5.8	0.0083	0.0098
Se %	0.0106	0.0003	3.4	0.0102	0.0110
Sb %	0.0058	0.0003	6.2	0.0054	0.0062

Resultados de la probeta 8

FMX 52U0016 Optik 52U0017

Sample :

Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:55:47

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Pb
2	96.7	0.158	0.257	1.31	0.0154	0.0307	0.0047
3	96.7	0.169	0.249	1.34	0.0149	0.0322	0.0045
5	96.7	0.171	0.257	1.32	0.0156	0.0326	0.0047
6	96.7	0.154	0.253	1.31	0.0151	0.0286	0.0049
7	96.7	0.176	0.257	1.32	0.0150	0.0316	0.0046
8	96.7	0.160	0.255	1.35	0.0158	0.0320	0.0049
Average	96.7	0.165	0.255	1.32	0.0153	0.0313	0.0047

	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
2	1.06	0.0114	0.0766	0.0259	0.0059	0.209	< 0.0005
3	1.07	0.0101	0.0767	0.0272	0.0056	0.213	< 0.0005
5	1.07	0.0110	0.0767	0.0269	0.0045	0.210	< 0.0005
6	1.07	0.0113	0.0767	0.0266	0.0059	0.206	< 0.0005
7	1.07	0.0112	0.0791	0.0266	0.0064	0.209	< 0.0005
8	1.07	0.0111	0.0797	0.0282	0.0059	0.214	< 0.0005
Average	1.07	0.0110	0.0776	0.0269	0.0057	0.210	< 0.0005

	Ti	V	W	Sn	B	Ca	Zr
2	0.0357	0.0034	< 0.0100	0.0187	0.0009	0.0002	0.0049
3	0.0363	0.0034	< 0.0100	0.0198	0.0011	0.0002	0.0051
5	0.0349	0.0038	< 0.0100	0.0197	0.0010	0.0002	0.0051
6	0.0351	0.0033	< 0.0100	0.0193	0.0009	0.0002	0.0051
7	0.0371	0.0037	< 0.0100	0.0199	0.0010	0.0002	0.0059
8	0.0380	0.0036	< 0.0100	0.0198	0.0012	0.0002	0.0053
Average	0.0362	0.0035	< 0.0100	0.0195	0.0010	0.0002	0.0052

	Zn	Bi	As	Se	Sb
2	0.0026	0.0128	0.0090	0.0111	0.0052
3	0.0025	0.0127	0.0087	0.0109	0.0071
5	0.0025	0.0125	0.0086	0.0110	0.0052
6	0.0026	0.0133	0.0090	0.0108	0.0065
7	0.0026	0.0127	0.0091	0.0109	0.0061
8	0.0026	0.0132	0.0089	0.0109	0.0069
Average	0.0026	0.0129	0.0089	0.0109	0.0062

Promedio de los resultados de la probeta 8

FMX 52U0016 Optik 52U0017
Sample :
Alloy : FE_150 Mode : PA 21/02/2019 08:55:47

Number of burns : 6

Element	Average	S.D.	R.S.D.	Minimum	Maximum
Fe %	96.7	0.0234	0.0	96.7	96.7
C %	0.165	0.0085	5.2	0.154	0.176
Si %	0.255	0.0029	1.1	0.249	0.257
Mn %	1.32	0.0141	1.1	1.31	1.35
P %	0.0153	0.0003	2.3	0.0149	0.0158
S %	0.0313	0.0014	4.7	0.0286	0.0326
Pb %	0.0047	0.0001	3.1	0.0045	0.0049
Cr %	1.07	0.0041	0.4	1.06	1.07
Mo %	0.0110	0.0004	4.2	0.0101	0.0114
Ni %	0.0776	0.0014	1.8	0.0766	0.0797
Al %	0.0269	0.0007	2.8	0.0259	0.0282
Co %	0.0057	0.0006	11.0	0.0045	0.0064
Cu %	0.210	0.0028	1.4	0.206	0.214
Nb %	< 0.0005	0.0000	0.0	< 0.0005	< 0.0005
Ti %	0.0362	0.0011	3.3	0.0349	0.0380
V %	0.0035	0.0001	5.0	0.0033	0.0038
W %	< 0.0100	0.0000	0.0	< 0.0100	< 0.0100
Sn %	0.0195	0.0004	2.4	0.0187	0.0199
B %	0.0010	0.0001	9.5	0.0009	0.0012
Ca %	0.0002	0.0000	9.2	0.0002	0.0002
Zr %	0.0052	0.0003	6.6	0.0049	0.0059
Zn %	0.0026	0.0000	2.1	0.0025	0.0026
Bi %	0.0129	0.0003	2.5	0.0125	0.0133
As %	0.0089	0.0001	2.2	0.0086	0.0091
Se %	0.0109	0.0000	0.8	0.0108	0.0111
Sb %	0.0062	0.0008	13.1	0.0052	0.0071

Anexos 4: Especificaciones del material



Heine + Beisswenger • Postfach 1510 • 70705 Fellbach

HEINE STEEL BV
Doggersbank 2
7202 CT ZUTPHEN
Niederlande



Auszug a. dem Werkszeugnis
 Datum : 25/10/2018
 Bestellposition :
 Lieferposition :
 Auftragsposition :
 Kundennummer :

Auszug aus dem Abnahmeprüfzeugnis nach EN 10204

Material : 16MnCr(S)5
 Lieferzustand / supply condition :
 Abmessung / size : dia 38 mm
 Quantität / quantity : 54 kg
 Charge / Heat : 17906

Chemische Zusammensetzung / Cast analysis						(Schmelzanalyse)	
Merkmal	Wert	Merkmal	Wert	Merkmal	Wert	Merkmal	Wert
C	0.17 %	Si	0.24 %	Mn	1.08 %	P	0.015 %
S	0.02 %	Cr	0.89 %	Mo	0.02 %	Ni	0.10 %
B	0.00 %	Cu	0.24 %	Nb	0.004 %	A	0.016 %
As	0.008 %	Sn	0.015 %	Ti	0.02 %	V	0.004 %

Physikalische Werte / Physical properties		(Im Lieferzustand)
Merkmal	Wert	Merkmal
Zugfestigkeit / Tensile strength (RM)	N/mm ²	
Streckgrenze / Yield (RE)	N/mm ²	
Bruchdehnung / Elongation (A5)	%	
Einschnürung / Reduction of Area (Z)	%	
Härte / Hardness	HBW 184	



IVAN HERMAN C.A.
CARLA VILL
FACTURADOR



HEINE + BEISSWENGER
Stiftung + Co. KG
Eisenbahnstr. 3-5
70705 Fellbach

HEINE + BEISSWENGER
Stiftung + Co. KG
Mühlweg 12
68773 Langensheim

HEINE + BEISSWENGER
Stiftung + Co. KG
Am Fendelsberg 1
84094 Ebendorf


HEINE + BEISSWENGER
Stiftung + Co. KG
Lagerei 21
64807 Dillburg

HEINE + BEISSWENGER
Stiftung + Co. KG
Industriest. 13
78647 Trossingen

Sitz: Fellbach; Reg.gericht: Stuttgart HRB 268723; SA-Nr.: 5948765510; UST-IdNr.: DE 147219626; KomiT: Ferdinand Heine-Stiftung;
 Vorstände: M. Heine, A. Müller, R. Heine

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 5: Medidas de la dureza en el material AISI 5115

 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR	Informe de Resultados de los Laboratorios
LABORATORIO	Ciencia de Materiales
CARRERA	Ingeniería Mecánica
SEDE	Quito – Campus Sur

Ensayo de Dureza Rockwell

Para la realización del ensayo Rockwell se tomó en cuenta las recomendaciones de la norma NTE INEN-ISO 6508-1. Medidas para verificar la propiedad de dureza con la del proveedor.

Material:	AISI 5115							
Escala de Dureza:	Rockwell		Carga Mayor:		150 kgf			
Dimensiones de Probetas								
Diámetro:	50.8 mm		Espesor:		25.4 mm			
Valor de Dureza (HRC)								
Mediciones	Numero de Probetas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,4	4,3	4,4	4,3	6,1	4,6	5,2	4
2	4,1	4,1	3,9	4,7	4,5	3,9	4,7	4,8
3	3,8	4,6	4,5	5	5,4	4,6	4,5	4,1
4	4,1	4,5	3,5	4,7	4,5	5,2	4,6	4,5
5	4	4,2	4	4,8	4,2	4,6	4,8	3,7
6	4,4	4,2	3,7	5,5	3,9	5	4,6	4,5
7	3,6	5,8	4,8	5,6	4,3	4,6	5,5	3,9
8	3,5	5,2	3,6	6,2	4,4	4,4	5	4,2
Valor Promedio:	3,86	4,61	3,60	5,10	4,66	4,61	4,86	4,21

Imágenes donde se evidencia las mediciones del ensayo de Dureza




Daifonso

Firma y nombre de la persona encargada del laboratorio

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 6: Medidas de la dureza en el material AISI 5115 después del proceso de cementado

 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA <small>ECUADOR</small>		Informe de Resultados de los Laboratorios
LABORATORIO	Ciencia de Materiales	
CARRERA	Ingeniería Mecánica	
SEDE	Quito – Campus Sur	

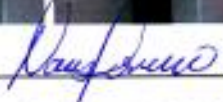
Ensayo de Dureza Rockwell

Para la realización del ensayo Rockwell se tomó en cuenta las recomendaciones de la norma NTE INEN-ISO 6508-1. Valores de dureza después del tratamiento térmico de cementación

Material:	AISI 5115			
Escala de Dureza:	Rockwell	Carga Mayor:	150 kgf	
Dimensiones de Probetas				
Diámetro:	50.8 mm	Espesor:	25.4 mm	
Valor de Dureza (HRC)				
Mediciones	Tiempo de permanencia (hr)			
	1	2	3	4
1	47,9	55,2	60,9	61,3
2	53,9	54,8	61	62,6
3	54,9	54,9	61	62,3
4	55	55,3	61	61,8
5	55	54,7	61,2	62,1
6	55,1	54,7	61,4	62,5
7	55,1	54,4	61	61,9
8	55,1	53,4	60,7	61,6
Valor Promedio:	54,00	54,68	61,03	62,01

Imágenes donde se evidencia las mediciones del ensayo de Dureza





Firma y nombre de la persona encargada del laboratorio

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 7: Informe de ensayo de dureza y microestructura



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
LABORATORIO DE METALOGRAFÍA, DESGASTE Y FALLA

Orden de Trabajo N°. 0006241

Solicitado por:

Sr. Jonathan Panchi – Sr. Miguel Ángel Gualoto
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Muestras suministradas por:

Sr. Jonathan Panchi – Sr. Miguel Ángel Gualoto

Tipo de trabajo:

Análisis Metalográfico y ensayo de micro-dureza

Fecha:

Quito, 28 de Mayo del 2019

1. ANTECEDENTES.


Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, ocho probetas, según especificaciones del cliente, 4 son de acero AISI 5115 con tratamiento térmico de cementado y 4 de acero AISI 5115 con tratamiento térmico de nitrurado, se solicita realizar el ensayo metalográfico a las 8 probetas y micro-indentaciones a las 4 probetas con nitrurado. Fotografías N° 1 y N° 2.

2. IDENTIFICACIÓN DE MUESTRA.

Los elementos entregados en el laboratorio se identifican de la siguiente manera. Tabla 1

Tabla 1. Identificación de la muestra entregada al laboratorio

Muestra	Descripción	Cantidad	Código	Observaciones
1	1 hora cementado	1	MC1	Elemento con espesor de 24,3 mm y longitud de 24,8 mm. Fotografía N° 1.
2	2 horas cementado	1	MC2	Elemento con espesor de 25,1 mm y longitud de 24,2 mm. Fotografía N° 1
3	3 horas cementado	1	MC3	Elemento con espesor de 25 mm y longitud de 24,6 mm. Fotografía N° 1.
4	4 horas cementado	1	MC4	Elemento con espesor de 25 mm y longitud de 24,4 mm. Fotografía N° 1.



Orden de Trabajo No. 0006241

Página 1 de 14

1	1 hora niturado	1	MDN1	Elemento con espesor de 25 mm y longitud de 24,8 mm. Fotografía N° 2.
2	2 horas niturado	1	MDN2	Elemento con espesor de 25 mm y longitud de 24,4 mm. Fotografía N° 2.
3	3 horas niturado	1	MDN3	Elemento con espesor de 25,6 mm y longitud de 25,2 mm. Fotografía N° 2.
4	4 horas niturado	1	MDN4	Elemento con espesor de 25,1 mm y longitud de 24,9 mm. Fotografía N° 2.

3. MAPEO DE DUREZAS

El mapeo de durezas se lo realizó en el borde de las probetas en sentido transversal tal como se muestra en la Figura N° 1, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla N° 2, en base a la norma ASTM E 394.

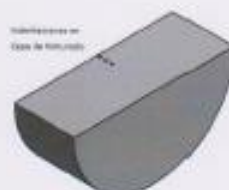


Figura N° 1 Bosquejo de la probeta para ensayo de dureza

Tabla N° 2. Valores de micro dureza.

Muestra		Durezas Rockwell HV ^a		
MDN1	1 Indentación cerca del borde	324,39	312,35	366,52
	2 Indentación cerca del borde	194,45	181,47	206,02
MDN2	1 Indentación cerca del borde	585,41	607,05	527,57
	2 Indentación cerca del borde	568,23	509,02	525,74
MDN3	1 Indentación cerca del borde	609,88	660,32	xx
	2 Indentación cerca del borde	413,57	661,81	xx
	3 Indentación cerca del borde	255,92	495,98	xx
MDN4	1 Indentación cerca del borde	627,91	549,09	xx
	2 Indentación cerca del borde	595,31	639,22	xx
	3 Indentación cerca del borde	437,42	424,70	xx

^aSe anexa los informes de micro indentaciones. Fotografías N° 3, N° 4, N° 5, N° 6.



4. RESULTADO METALOGRAFICO

La metalografía se la realizó en sentido transversal en el borde de las probetas realizadas el tratamiento térmico, obteniendo los datos que se muestran en la tabla N° 3.

Tabla N° 3. Análisis Metalográfico.

MUESTRA	OBSERVACIONES
MC1	A una magnificación de 50X se observa que las probetas de acero presentan en su borde una capa de tratamiento térmico superficial con un espesor de aproximadamente 0,38 mm - 0,52 mm - 0,65 mm y 0,87 mm (Ver Fotografías N° 7, N° 8, N° 9 y N° 10). A una magnificación de 100X la microestructura es no homogénea y corresponde a martensita revenida (Ver Fotografías N° 11, N° 12, N° 13 y N° 14). A una magnificación de 500X, se observa que el acero posee una matriz de ferrita acicular y se observa a detalle el cambio microestructural. Fotografías N° 19, N° 20, N° 21, N° 22, N° 23, N° 24, N° 25 y N° 26.
MC2	
MC3	
MC4	
MDN1	A una magnificación de 100X se observa que las probetas de acero presentan una microestructura no homogénea de tipo ferrítico - perlítico y que en la superficie presenta una capa de tratamiento térmico superficial, en el caso de MND2 y MND3 con un espesor de aproximadamente 0,095 mm - 0,45 mm (Ver Fotografías N° 15, N° 16, N° 17 y N° 18). A una magnificación de 500X, se observa que el acero posee una matriz de ferrita con colonias de perlita y se observa a detalle el cambio microestructural. Fotografías N° 27, N° 28, N° 29, N° 30, N° 31, N° 32, N° 33 y N° 34.
MDN2	
MDN3	
MDN4	


Atentamente:

Elaborado por:


 Ing. Patricia Priano
 Especialista del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.



Revisado por:


 Ing. Carlos Diaz
 Jefe del Laboratorio de Metalografía,
 Desgaste y Falla.

Nota: Se anexan 34 fotografías y 10 informes.

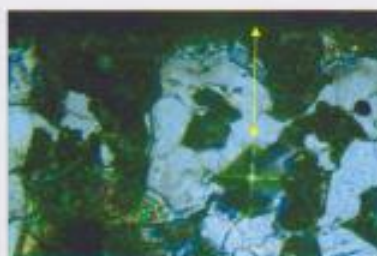
ANEXO FOTOGRAFÍCO



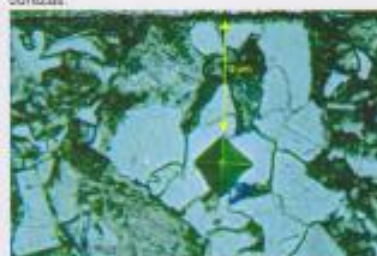
Fotografía N° 1. Pruebas de acero cementado entregadas en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla para análisis metalográfico.



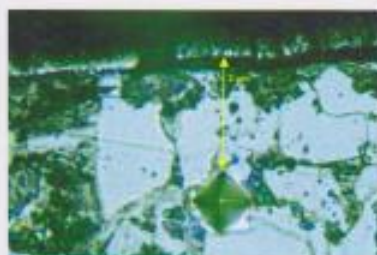
Fotografía N° 2. Pruebas de acero nitruadas entregadas en el laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla para análisis metalográfico y ensayo de microdurezas.



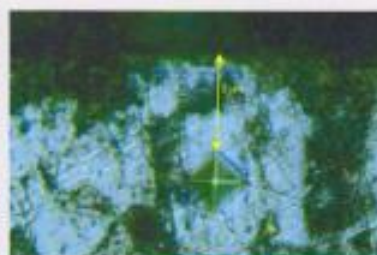
Fotografía N° 3. MDN 1, Primera indentación a $2\ \mu\text{m}$ (micras) del borde.



Fotografía N° 4. MDN 2, Primera indentación a $2\ \mu\text{m}$ (micras) del borde.

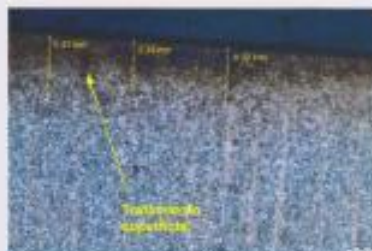


Fotografía N° 5. MDN 3, Primera indentación a $2\ \mu\text{m}$ (micras) del borde.

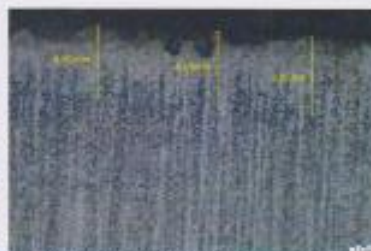


Fotografía N° 6. MDN 4, Primera indentación a $2\ \mu\text{m}$ (micras) del borde.

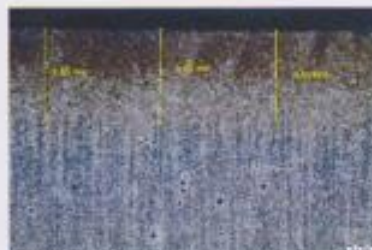




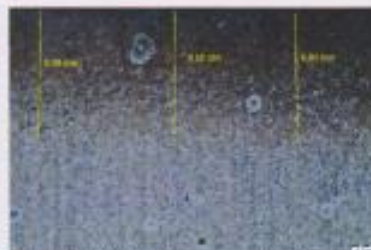
Fotografía N° 7. MC1, acero con tratamiento térmico superficial con espesor aproximado de 0.38 mm.



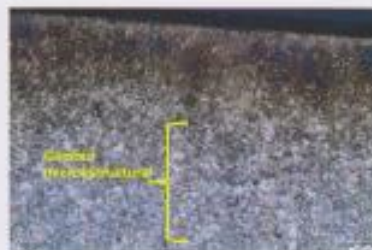
Fotografía N° 8. MC2, acero con tratamiento térmico superficial con espesor aproximado de 0.62 mm.



Fotografía N° 9. MC3, acero con tratamiento térmico superficial con espesor aproximado de 0.65 mm.



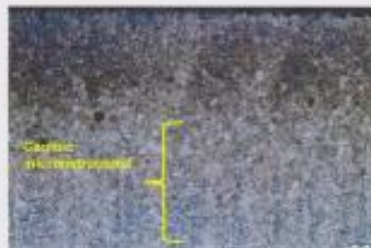
Fotografía N° 10. MC4, acero con tratamiento térmico superficial con espesor aproximado de 0.87 mm.



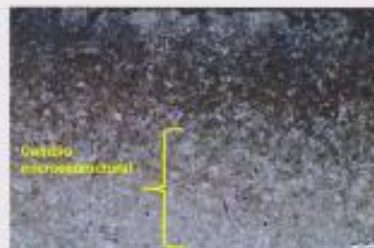
Fotografía N° 11. MC1, acero con microestructura no homogénea correspondiente a martensita revenida.



Fotografía N° 12. MC2, acero con microestructura no homogénea correspondiente a martensita revenida.



Fotografía N° 13, MC3, acero con microestructura no homogénea correspondiente a martensita revenida.



Fotografía N° 14, MC4, acero con microestructura no homogénea correspondiente a martensita revenida.



Fotografía N° 15, MND1, acero con microestructura no homogénea de tipo ferrítica perlitica.



Fotografía N° 16, MND2, acero con tratamiento térmico superficial de nitrado, espesor de 0,085 mm microestructura no homogénea de tipo ferrítica perlitica.



Fotografía N° 17, MND3, acero con tratamiento térmico superficial de nitrado, espesor de 0,48 mm microestructura no homogénea de tipo ferrítica perlitica.



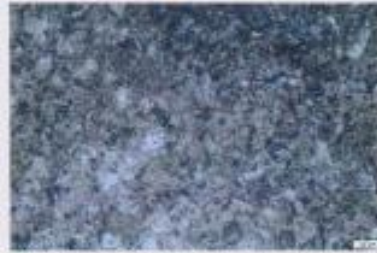
Fotografía N° 18, MND4, acero con tratamiento térmico superficial de nitrado, microestructura no homogénea de tipo ferrítica perlitica.



Informe Técnico No. 0000241



Fotografía N° 19. MC1, centro del elemento, acero con matriz de ferrita acicular, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 20. MC1, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 21. MC2, centro del elemento, acero con matriz de ferrita acicular, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 22. MC2, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 23. MC3, centro del elemento, acero con matriz de ferrita acicular, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 24. MC3, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.





Fotografía N° 25. MC4, centro del elemento, acero con matriz de ferrita acicular, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 26. MC4, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.



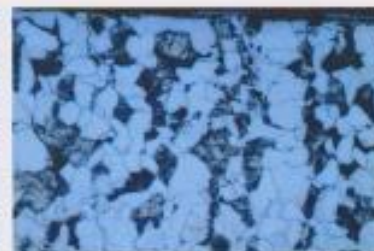
Fotografía N° 27. MND1, centro del elemento, acero con matriz de ferrita con colonias de perlita.



Fotografía N° 28. MND1, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.



Fotografía N° 29. MND2, centro del elemento, acero con matriz de ferrita con colonias de perlita.



Fotografía N° 30. MND2, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural.



Orden de Trabajo No. 0000241



Fotografía N° 31, MND3, centro del elemento, acero con matriz de ferrita con colonias de perlita



Fotografía N° 32, MND3, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural



Fotografía N° 33, MND4, centro del elemento, acero con matriz de ferrita con colonias de perlita



Fotografía N° 34, MND4, borde con tratamiento térmico superficial, detalle cambio microestructural



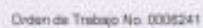
Design	Date	15/08/2019
Version	1.000	1.00
Reported by	Site	1



Source	State	12/01/2019
Channel	Local	100
Reported by	DR	-



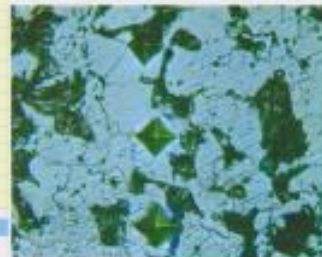
Página 10 de 14

[illegible][illegible]

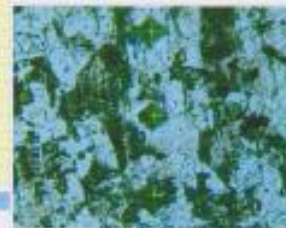
This micrograph shows a metal surface with a complex network of cracks and corrosion products. The cracks are dark, irregular lines of varying widths, some branching out. The corrosion products are lighter, more crystalline or flake-like structures that have formed along the cracks and on the surrounding surface. The overall appearance is one of significant material degradation.



Micro Hardness Analysis Report						
Sample	Date		2023/03/19			
Material	Load		100			
Reported by	Rev		1			
Load	HR	HV	H	HR	HR	Depth
10	52	427.81	17.18	11.20	17.18	
10	54	500.31	18.23	11.84	18.23	
10	48	427.40	16.44	10.75	16.44	
Mean						
Mean	51.33	444.51	17.28	11.26	17.28	0.00
Signed by						
Date						



Micro Hardness Analysis Report						
Sample	Date		2023/03/19			
Material	Load		100			
Reported by	Rev		1			
Load	HR	HV	H	HR	HR	Depth
101	52	449.09	18.42	12.23	18.42	
102	49	429.22	16.88	11.20	16.88	
103	48	424.75	16.40	11.10	16.40	
Mean						
Mean	51.33	444.51	17.28	11.26	17.28	0.00
Signed by						
Date						



Orden de Trabajo No. 0006241

Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi

Anexos 8: Evidencias fotográficas



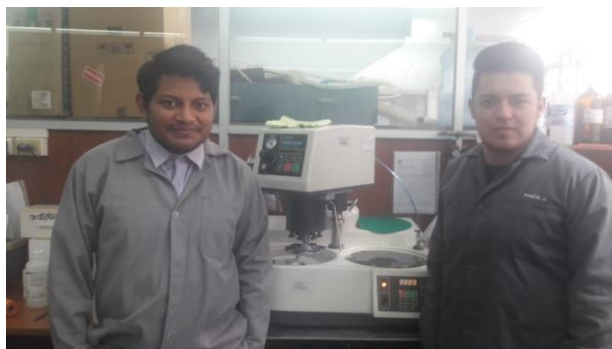
Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi



Elaborado por: Miguel Gualoto & Jonathan Panchi